

Школа ИШЭ  
 Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
 Отделение школы (НОЦ) электроэнергетики и электротехники

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Асинхронный электропривод неполно-поворотной заслонки УДК 62-83-523:662.922.3

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6К	Рындин Павел Станиславович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев А.Ю.	к.т.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Подопригора Игнат Валерьевич	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Мезенцева Ирина Леонидовна			

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника	Тютеева П. В.	к.т.н.		

**ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП**  
**13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»**

<b>Код результата</b>	<b>Результат обучения (выпускник должен быть готов)</b>
<b>Универсальные компетенции</b>	
P1	<i>Совершенствовать</i> и развивать свой интеллектуальный и общекультурный уровень, добиваться нравственного и физического совершенствования своей личности, обучению новым методам исследования, к изменению научного и научно-производственного профиля своей профессиональной деятельности.
P2	<i>Свободно пользоваться русским и иностранным языками</i> как средством делового общения, способностью к активной социальной мобильности.
P3	<i>Использовать</i> на практике навыки и умения в организации научно-исследовательских и производственных работ, в управлении коллективом, использовать знания правовых и этических норм при оценке последствий своей профессиональной деятельности.
P4	<i>Использовать</i> представление о методологических основах научного познания и творчества, роли научной информации в развитии науки, готовностью вести работу с привлечением современных информационных технологий, синтезировать и критически резюмировать информацию.
<b>Профессиональные компетенции</b>	
P5	<i>Применять</i> углубленные естественнонаучные, математические, социальноэкономические и профессиональные знания в междисциплинарном контексте в инновационной инженерной деятельности в области электроэнергетики и электротехники.
P6	Ставить и <i>решать инновационные задачи</i> инженерного анализа в области электроэнергетики и электротехники с использованием глубоких фундаментальных и специальных знаний, аналитических методов и сложных моделей в условиях неопределенности.
P7	Выполнять <i>инженерные проекты</i> с применением оригинальных методов проектирования для достижения новых результатов, обеспечивающих конкурентные преимущества электроэнергетического и электротехнического производства в условиях жестких экономических и экологических ограничений.
P8	Проводить инновационные <i>инженерные исследования</i> в области электроэнергетики и электротехники, включая критический анализ данных из мировых информационных ресурсов.
P9	Проводить технико-экономическое обоснование проектных решений; выполнять организационно-плановые расчеты по созданию или реорганизации производственных участков, планировать работу персонала и фондов оплаты труда; определять и обеспечивать эффективные режимы технологического процесса.
P10	Проводить <i>монтажные, регулировочные, испытательные, наладочные работы</i> электроэнергетического и электротехнического оборудования.

P11	<i>Осваивать новое</i> электроэнергетическое и электротехническое оборудование; проверять техническое состояние и остаточный ресурс оборудования и организовывать профилактический осмотр и текущий ремонт.
P12	Разрабатывать рабочую <i>проектную и научно-техническую документацию</i> в соответствии со стандартами, техническими условиями и другими нормативными документами; организовывать метрологическое обеспечение электроэнергетического и электротехнического оборудования; составлять <i>оперативную документацию</i> , предусмотренную правилами технической эксплуатации оборудования и организации работы.

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа ИШЭ  
 Направление подготовки (специальность) 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника  
 Отделение школы (НОЦ) электроэнергетики и электротехники

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
Тютеева П.В.  
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

### **ЗАДАНИЕ** **на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

бакалаврской работы
---------------------

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
5А6К	Рындин Павел Станиславович

Тема работы:

Асинхронный электропривод неполно-поворотной заслонки	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	59-78/с 28.02.2020

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--

### ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

<b>Исходные данные к работе</b>  <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i>	Материалы производственной практики, техническая литература, техническая документации.
--	--

<p><b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>  <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- постановка задачи проектирования;</li> <li>- проектирование электропривода неполно-поворотной заслонки в трубопроводной арматуре;</li> <li>- выбор типа преобразователя частоты и способа регулирования заслонками;</li> <li>- расчет и построение характеристик переходных процессов электродвигателя;</li> <li>- разработка и исследование имитационной модели электропривода;</li> <li>- разработка раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»;</li> <li>- разработка раздела «Социальная ответственность»;</li> <li>- заключение.</li> </ul>
<p><b>Перечень графического материала</b>  <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p>	<p>Графики переходных режимов асинхронного электродвигателя. Структурная схема имитационной модели асинхронного электропривода.</p>
<p><b>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</b>  <i>(с указанием разделов)</i></p>	
<p><b>Раздел</b></p>	<p><b>Консультант</b></p>
<p><b>Социальная ответственность</b></p>	<p>Мезенцева Ирина Леонидовна</p>
<p><b>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</b></p>	<p>Кандидат экономических наук          Подопригора Игнат Валерьевич</p>
<p><b>Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:</b></p>	
<p>Все разделы выпускной квалификационной работы написаны на русском языке.</p>	

<p><b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b></p>	
--	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Чернышев Александр Юрьевич	К.Т.Н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6К	Рындин Павел Станиславович		

# ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
5А6К	Рындин Павел Станиславович

Школа	ИШЭ	Отделение школы (НОЦ)	
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	13.03.02. Электроэнергетика и электротехника

## Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Затраты на оборудование определяются согласно стоимости оборудования по прейскурантам. Заработная плата определяется исходя из тарифной ставки и коэффициентов, зависящих от различных условий: организация, регион.
2. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Отчисления во внебюджетные страховые фонды.

## Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения	Потенциал и перспективность реализации проекта оценивается путем сравнения возможных вариантов осуществления проекта.
2. Планирование и формирование графика работ по реализации технического проекта.	Используя оценку трудоемкости работ для каждого исполнителя, определяется полное время на выполнение работ.
3. Составление сметы технического проекта.	Составление сметы проводится группировки затрат по статьям: - Расчёт затрат на материалы - Расчёт основной и дополнительной заработной платы - Расчёт отчислений от заработной платы - Расчёт накладных расходов - Калькуляция плановой себестоимости.

## Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. Линейный график выполнения работ
2. Оценочная карта QuaD
3. Матрица SWOT
4. Альтернативы проведения НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

## Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Подопригора И.В.	К.Э.Н.		

## Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6К	Рындин Павел Станиславович		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
5А6К	Рындин Павел Станиславович

<b>Школа</b>	<b>ИШЭ</b>	<b>Отделение (НОЦ)</b>	<b>Электроэнергетики и Электротехники</b>
<b>Уровень образования</b>	Бакалавриат	<b>Направление/специальность</b>	13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Тема ВКР:

<b>Асинхронный электропривод неполно-поворотной заслонки</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Территория цеха электроснабжения, главным объектом рассмотрения является асинхронный ЭП неполно-поворотной заслонки
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>– специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства;</li> <li>– организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</li> </ul>	- Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 27.12.2018); - ГОСТ 12.2.032–78 ССБТ; - ГОСТ 21889–76; - СН 2.2.4/2.1.8.562–96; - СП 51.13330.2011; - СП 52.13330.2016; -ГОСТ 12.1.005-88; -СанПиН 2.2.4.548-96; -СП 2.2.1.1312-03; -ГОСТ 12.1.038-82; -ГОСТ 12.1.009-2017; -ГОСТ Р 12.1.019-2009; -ГОСТ Р 56165-2019; -ГОСТ 12.1.033-81.
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Возможные вредные факторы: – Превышение уровня шума; – Отсутствие или недостаток освещения; – Отклонение показателей микроклимата. Возможные опасные факторы: – Электропоражение.
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	– Влияние на атмосферу; – Влияние на гидросферу; – Влияние литосферу.
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Возможные ЧС: – Пожар – Наводнение – Землетрясение – Ураган Наиболее вероятное ЧС: Пожар.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД	Мезенцева И. Л.			

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
5А6К	Рындин Павел Станиславович		



## Оглавление

<b>РЕФЕРАТ .....</b>	<b>10</b>
<b>1. ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>11</b>
<b>2. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ ЗАСЛОНКОЙ .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 ЭЛЕКТРОПРИВОД «ГУСАР».....</b>	<b>16</b>
<b>2.3 МОДУЛЬ УПРАВЛЕНИЯ РЕГУЛИРУЮЩИЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ЗАСЛОНКИ .....</b>	<b>21</b>
<b>3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ .....</b>	<b>32</b>
<b>3.1 ВОЗМОЖНОСТИ ПАКЕТА MATLAB .....</b>	<b>32</b>
<b>3.2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА .....</b>	<b>34</b>
3.2.1 Описание построения имитационной модели АД при использовании неподвижной системы координат и построение переходных процессов в режиме пуска асинхронной машины. ....	34
3.2.2 Асинхронный взрывозащищенный двигатель ДАТ – I56М – 02 .....	44
3.2.3 Описание построения имитационной модели АД во вращающейся системе координат .....	48
<b>3.3 ОПТИМИЗАЦИЯ ДВУХКОНТУРНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА .....</b>	<b>55</b>
<b>3.4 ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ САУ .....</b>	<b>69</b>
<b>4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА РАБОТУ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С МОДУЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ ESD-VSX .....</b>	<b>77</b>
<b>4.1 РАБОТА СИСТЕМЫ ПРИ СНИЖЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ НА ОДНОЙ ИЗ ФАЗ СРАЗУ ПОСЛЕ СТАРТА ДВИГАТЕЛЯ. ....</b>	<b>81</b>
<b>4.2 РАБОТА СИСТЕМЫ, КОГДА НАПРЯЖЕНИЕ В СЕТИ ПОНИЖЕННОЕ НА ВСЕХ ФАЗАХ. ....</b>	<b>82</b>
<b>5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ .....</b>	<b>83</b>
<b>6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ .....</b>	<b>100</b>
<b>7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....</b>	<b>112</b>
<b>Список литературы.....</b>	<b>113</b>

## РЕФЕРАТ

Целью выпускной квалификационной работы является проектирование частотно-регулируемого электропривода заслонки для САР давления на магистральных нефтеперекачивающих станциях.

Дипломный проект 115 с., рисунков 52, таблиц 16, источников 32.

В процессе работы были исследованы переходные процессы модели привода ГУСАР при закрытии заслонки, открытии, повороте на несколько градусов градус, при пониженном напряжении сети.

Дипломный проект содержит описание требований предъявляемых к электроприводу заслонки, разработанный алгоритм формирования момента, разработанную модель электропривода заслонки в среде Matlab Simulink.

Рассчитаны технико-экономические показатели; рассмотрены основные вопросы экологичности и безопасности проекта;

Для исследования привода были использованы следующие программы:

- MATLAB v6.1;
- MATHCAD v11.
- SimBlock v1.1

При оформлении дипломного проекта были использованы программы:

- MS WORD;
- PAINT;
- VISIO.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация производства на основе микроэлектронной техники для развития и совершенствования существующих и создающихся технологических производств, является одним из важных направлений производства.

Особенностью современного этапа развития автоматизации производства является появление и массовое применение качественно новых технических средств, изготовление сетей на базе микроэлектроники. Внедрение автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) приобретает особое значение в связи с ростом требований к скорости вычисления, переработки и выдачи информации. Поэтому разработка и исследование структур и режимов функционирования АСУ ТП на основе микроЭВМ является актуальной задачей. Использование микроЭВМ позволяет на порядок снизить затраты, обеспечивает повышение эффективности и расширение функциональных возможностей.

Одно из основных положений автоматизации процессов организационного управления заключается в создании безбумажной технологии обработки информации.

Программное обеспечение систем с персональными микро-ЭВМ выгодно отличается своей простотой, проблемной направленностью. Основной, определяющей целью управления оборудованием, технологическими и производственными процессами с помощью АСУ ТП является повышение производительности труда, улучшение качества продукции и использования материально-сырьевых и топливно-энергетических ресурсов. Дальнейшее совершенствование АСУ ТП связано с повышением их экономической эффективности путем индустриального создания автоматизированных технологических комплексов с АСУ ТП.

Одним из существенных препятствий на пути индустриализации создания АСУ ТП являются традиционные методы (трудоемкие) программирования ЭВМ и недостаточная адаптивность типовых АСУ ТП к более широкому кругу условий работы объектов управления. Преодолеть эти препятствия для предприятий, самостоятельно внедряющих АСУ ТП можно, во-первых, передачей значительной степени программного обеспечения из универсальных ОЗУ в ПЗУ микропроцессорных функциональных блоков, из которых и следует формировать логическую и вычислительную часть АСУ ТП, т. е. передачей задач традиционного программирования в область массового производства устройств электронной техники; во-вторых, развитием специализированных операционных систем АСУ ТП, обладающих широкими возможностями к адаптации и работающими с микропроцессорными функциональными блоками; в-третьих, созданием программно-аппаратурных средств реализации диалоговых режимов настройки и работы АСУ ТП.

Уровень автоматизации производственных процессов, производительность труда и качество выпускаемой продукции определяется силовой электровооруженностью труда, основу которой составляют регулируемые электрические машины.

Целью настоящего дипломного проекта является разработка и подбор электропривода для автоматической системы регулирования давлением.

## **2. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ**

### **2.1 СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ДАВЛЕНИЯ ЗАСЛОНКОЙ**

Известно, что обеспечение стабильного во времени режима перекачки продукта по нефтепроводу в условиях различных внешних возмущений является основной задачей нефтепроводного транспорта. Данная задача относится к классу задач комплексного управления сложной системой, при решении которой инженерам обычно приходится учитывать множество энергетических, физических и экономических ограничений, решая при этом различные сопряженные проблемы. Одной из таких проблем является регулирование давления на входе и выходе нефтеперекачивающей станции.

Система автоматического регулирования (САР) давления НПС (нефтеперекачивающей станции) предназначена для поддержания давления на входе (и выходе) магистральной насосной станции (МНС) не менее установочного значения, обеспечивающего кавитационный запас, и давления на выходе МНС не более уставочного значения, обеспечивающего сохранность трубопровода и требования режима перекачки нефтепродуктов, а также для снижения нагрузки на электродвигатели магистральных насосных агрегатов при пусках. Регулирование осуществляется с помощью поворотных заслонок, установленных на выходе МНС. Управление заслонками может осуществляться поворотным механизмом посредством асинхронного короткозамкнутого электродвигателя с помощью тиристорного преобразователя или преобразователя частоты [9].

Такую систему можно рассмотреть на примере метода дросселирования заслонкой на выходе станции.

На рисунке 1 изображена общая схема регулирования давления.

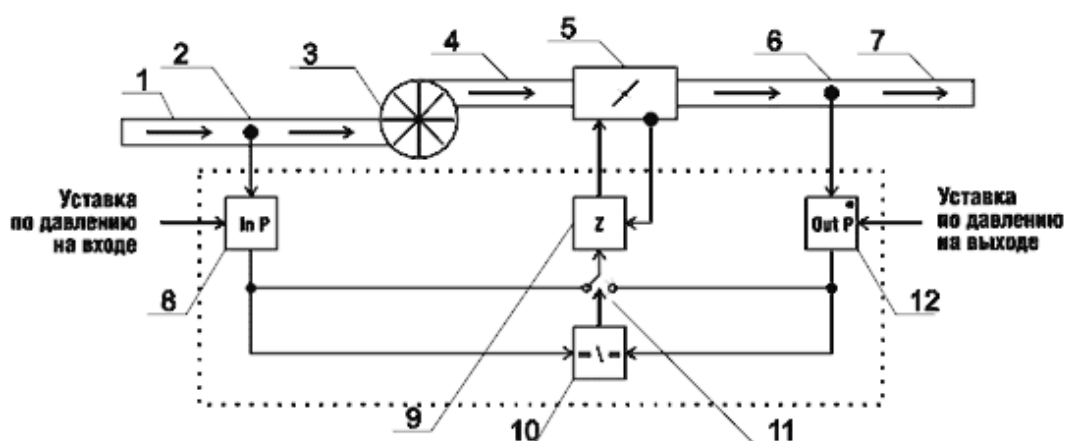


Рисунок 1 – общая схема регулирования давления:

1 - вход станции; 2 - датчики давления на входе станции; 3 - насосный агрегат; 4 – коллектор; 5 – регулирующий механизм (заслонка); 6 – датчик давления на выходе станции; 7 – выход станции; 8 – регулятор контура давления на выходе станции; 9 – регулятор контура положения заслонки; 10 – элемент сравнения; 11 – переключатель; 12 – регулятор контура давления на выходе (реверсивный)

В системах регулирования давления для улучшения динамических характеристик последних должны использоваться пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы (ПИД-регуляторы). Причем регулирование давления на приеме и выходе перекачивающих станции должно осуществляться различными регуляторами, переключаемыми с помощью селектора сигналов. Исходя из этого составлена схема регулирования изображенная на рисунке 1.

Поясним принципы ее действия:

Предельные уровни давления на входе и выходе станции служат уставками (уставки на блоках In P и Out P) для сложного внешнего контура управления, состоящего из двух регуляторов второго порядка (ПИД-регулятор с фильтрующим звеном). Исходя из текущих значений давления на входе и выходе, данные регуляторы вычисляют новое требуемое положение заслонки. Затем результаты вычисления регуляторов внешнего контура сравниваются, и на вход регулятора внутреннего контура в качестве уставки передается

больший из них. Регулятор внутреннего контура обеспечивает перевод заслонки в требуемое положение.

Как упоминалось выше, в качестве регуляторов в схеме регулирования были выбраны ПИД-регуляторы. Следовательно, при настройке системы у каждого из регуляторов должны настраиваться следующие параметры:

- коэффициент пропорциональности  $K_p$ ;
- постоянная времени интегрирования -  $T_i$ ;
- постоянная времени дифференцирования  $T_d$ .

В выбранной схеме изображенная на рисунке 1 присутствует два регулятора давления и один регулятор положения дросселирующей заслонки. Для такого случая должно служить применение адаптивных алгоритмов управления или алгоритмов с самонастройкой. При реализации схемы регулирования давления должны быть заложены алгоритмы самонастройки ПИД-регулятора по вещественному интерполяционному методу. Данный метод включает в себя идентификацию параметров технологического процесса и синтез регулятора для управления им в соответствии с требуемыми характеристиками переходного процесса:

- Идентификация параметров технологического процесса производится при помощи сопоставления его реакции на ступенчатое пробное воздействие и реакции звена с передаточной функцией первого (при грубой идентификации) или второго (при повышенных требованиях) порядка. Также определяется задержка по управлению.

Функция самонастройки может быть запущена дистанционно из удаленного диспетчерского пункта, что является важным фактором в организации безлюдной технологии перекачки нефти или нефтепродукта.

В данной работе рассмотрено управление системой векторным способом, да бы привод мог работать на разных частотах, т.е. при изменении напряжения, мог выдавать нужный момент для поворота заслонки на определенный угол.

На основе поставленных задач выбираем интеллектуальный электропривод для регулирующей и запорной арматуры, который будет

обеспечивать регулирование давления в МНС при помощи поворотной заслонки. Обоснование выбора привода зависит от заданного выходного момента и размера посадочного места. Также двигатель должен подходить по условию нагрева, способность его работы в режиме S3. Для дистанционного управления приводом выбираем блок управления ESD-VCX, который отвечает параметрам регулирования, сигнализации, пуска, останова и способа управления [7].

## **2.2 ЭЛЕКТРОПРИВОД «ГУСАР»**

Данный электропривод был выбран из условий поставленной задачи регулирования, мощности двигателя, режима работы, параметров сети, выходного момента, диаметра трубы, условий окружающей среды [1]. Далее приводится его описание.

Это интеллектуальный взрывобезопасный электропривод для управления регулирующей и запорной арматурой всех типов. Привод имеет в своем составе: приводной модуль, имеющий маркировку 1ExdПВТ4 и состоит из взрывонепроницаемой оболочки, включающей корпус, крышку бокса подключения питания и телеметрии, четыре кабельных ввода, электродвигателя; встроенного поста управления, имеющего окно индикатора; волновой редуктор, датчик положения, электронный датчик момента, пускатель двигателя, электронику управления, защитный корпус, ручной дублер, съемную муфту для стыковки с арматурой, индикатор и местные переключатели для настройки [11].

Внешний вид-устройство электропривода «ГУСАР» показан на рисунке 3.





Рисунок 3 – Электропривод запорно-регулирующей арматуры «ГУСАР»

Для того что бы использовать электропривод заслонки для неполного поворота мы используем волновой редуктор.

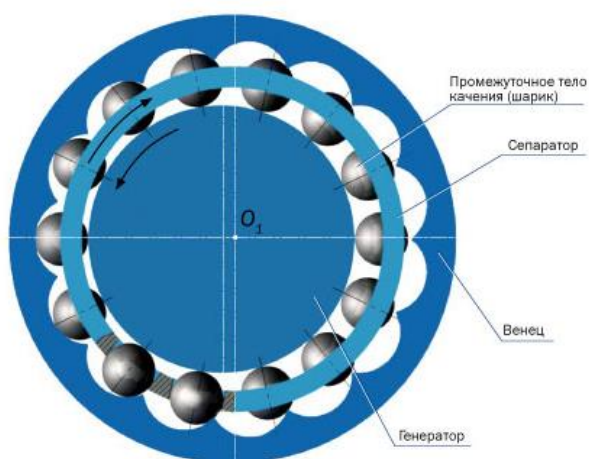


Рисунок 4 – Волновой редуктор

Волновая передача с промежуточными телами качения (шариками, роликами) состоит из генератора, выполненного в виде эксцентрика,

вращающегося вокруг оси  $O_1$ . На этой же оси установлен несущий сепаратор с радиальными пазами, в которых с возможностью радиального перемещения, размещены тела качения (шарики или ролики). Эти тела качения постоянно соприкасаются с рабочими поверхностями зубьев венца, описанных совокупностью укороченных гипоциклоид. При вращении генератора он своей поверхностью взаимодействует на тело качения и перемещает его по радиальному пазу сепаратора. Тело качения, в свою очередь, воздействует на наклонную поверхность зуба венца, чем вызывает возникновение радиальной силы, заставляющей поворачиваться несущий сепаратор, если заторможен венец, и, наоборот, поворачивается венец, если заторможен сепаратор. В этой передаче используется волновой принцип движения, где за один оборот входного звена (генератора) выходное звено (сепаратор) поворачивается на один зуб. Устанавливая на одном генераторе последовательно два или три ряда тел качения можно почти кратно повышать несущую способность передачи.

При заторможенном венце, передаточное отношение передачи  $i=z$ , а при заторможенном сепараторе  $i=z+1$ , где  $z$  - число тел качения. Основные детали передачи изготавливаются из высоколегированных сталей, имеют твердость от 48 до 63 единиц по шкале Роквелла и обработаны с высокой точностью и чистотой.

Передаточное отношение одной ступени для надежной работы можно задавать в пределах от 4 до 80. К.п.д. передачи достигает 0,9, она имеет очень высокую несущую способность, точность, плавность хода и малые массо-габаритные показатели. Созданы передачи, в которых мертвый ход выходного звена составляет всего две угловых минуты. Особое достоинство - это высокая износостойкость передачи из-за отсутствия в ней трения скольжения, поскольку фактически передача представляет собой подшипник с волнообразной беговой дорожкой.

В передаче используются специальные авиационные смазки ЭРА-12 (бывшая ВНИИ НП 286М) или AEROSELL, которые работают в интервале температур от  $-60^{\circ}$  до  $+120^{\circ}$  С, не гигроскопичны, не разлагаются от действия внешней среды, устойчивы к действию агрессивных сред, длительное время (годы) сохраняют свои свойства на всем сроке службы изделия без замены.

Такие смазки обеспечивают высокую надежность выпускаемых электроприводов, устройств для размыва донных отложений и остальной продукции. В отличие от традиционной волновой передачи с гибким звеном, эта передача не имеет гибких деформирующих звеньев и практически не имеет упругого закручивания входного вала относительно выходного даже при максимальных нагрузках.

Рассмотрим функции электропривода «Гусар» [11]. Такой тип электропривода для неполноворотных механизмов позволяет выполнять открытие, закрытие и регулировка проходного сечения запорной арматуры с точной остановкой в любых положениях за счет динамического торможения электродвигателя. Обеспечение любого закона движения и скорости движения на всей длине хода. Регулирование скорости электродвигателя от нуля до удвоенной номинальной скорости вращения. Сохранение информации и всех настроек при отключении питания на длительный срок (от 120 часов до 3-х лет). Обеспечение любых заданных крутящих моментов на открытие и закрытие запорной арматуры. Отключение электродвигателя при превышении заданных крутящих моментов. Работа в аварийных ситуациях: превышение стандартных допусков напряжения, обрыв фаз, случайное чередование фаз. Контроль сопротивления изоляции между фазами и корпусом электродвигателя. Контроль исправности датчика положения. Защита от перегрева обмоток двигателя. Защита от несанкционированных и ошибочных действий оператора. Определение и сигнализация об отсутствии электродвигателя в приводе. Настройка с дистанционного пульта управления всех параметров. Автоматическое запоминание 3200 последних событий в

реальном режиме времени. Автоматическая самодиагностика с индикацией типа отказа. Герметизация арматуры по заданному крутящему моменту. Автоматическая настройка электропривода на месте эксплуатации на конкретной арматуре. Режим раскачки арматуры при ее замерзании. Цифровая и световая индикация параметров и режимов работы.

Такие электропривода выпускаются во взрывозащищенном исполнении для эксплуатации в наружных установках и в помещениях во взрывоопасных зонах классов 1 и 2 ГОСТ Р 51330.9, где возможно образование паро- и газоздушных смесей категорий IIА, IIВ групп Т1, Т2, Т3, Т4.

Электромеханический модуль управления обеспечивает точную остановку рабочего органа в любом положении. Он имеет электромеханическую перестраиваемую муфту ограничения крутящего момента, отдельно настраиваемую на момент открытия одной величины и момент закрытия другой величины. Эта муфта может выключить привод в любом положении рабочего органа при превышении допустимой нагрузки.

Двусторонняя обгонная муфта на входном валу обеспечивает автоматическое включение в работу ручного дублера в любой момент времени с гарантированным исключением обратного воздействия на маховик ручного дублера при случайном включении электродвигателя. Исключает самопроизвольный поворот выходного вала и перемещение запорного органа арматуры при действии на него давления со стороны рабочей жидкости или газа. Электроприводы имеют местный указатель положения запорного органа арматуры. Электропривод может поставляться с переходным элементом для стыковки его с любым типом арматуры. Переходной элемент изготавливается после получения информации о модели арматуры и ее заводе-изготовителе. Электроприводы снабжены дублированными взрывозащищенными концевыми выключателями специального исполнения, имеющих гальванически развязанные контакты. Из них два выключателя путем механической регулировки настраиваются на положение "открыто" и "закрыто", а два других

- на ограничение момента или тягового усилия, отдельно на "открытие" и на "закрытие". При этом возможна регулировка величины момента от 60 до 100%. Электроприводы могут иметь замковое устройство блокировки ручного дублера от вмешательства посторонних лиц. Электропривод обеспечивает связь с пультом диспетчерского управления и может передавать сигналы о своем текущем состоянии и всех аварийных ситуациях. Возможна работа в местном и дистанционном режимах управления [1].

### 2.3 МОДУЛЬ УПРАВЛЕНИЯ РЕГУЛИРУЮЩИЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД ЗАСЛОНКИ

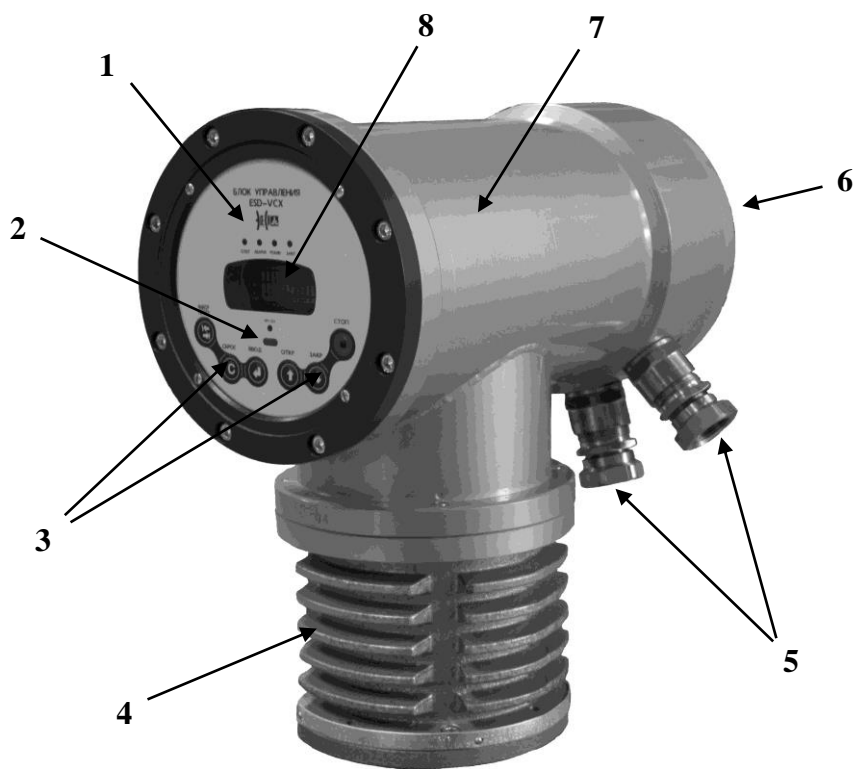


Рисунок 5 – Внешний вид блока:

1 – местный пост управления; 2 – Окно инфракрасного приемопередатчика; 3 – кнопки управления; 4 – Электродвигатель; 5 – Взрывозащищенные кабельные вводы; 6 – Крышка бокса подключения питания; 7 – Корпус блока; 8 - Буквенно-цифровой индикатор.

Блок управления ESD-VCX, согласно [2], с взрывозащитой вида "Взрывонепроницаемая оболочка" по ГОСТ Р 51330.1-99 и маркировкой взрывозащиты 1ExdПВТ4 предназначен для управления электроприводами запорной, запорно-регулирующей арматуры и шаровых кранов DN 100...1200 PN 1,6...10,0 во взрывоопасных зонах классов "1" и "2" по ГОСТ Р 51330.9-99, ГОСТ Р 51330.13-99, гл. 7.3 ПУЭ, ПБ 08-624-03, в которых возможно образование паро- и газовоздушных смесей категорий ПА, ПВ группы Т1, Т2, Т3, Т4 по классификации ГОСТ Р 51330.11-99 и ГОСТ Р 51330.5-99.

По устойчивости к климатическим воздействиям окружающей среды блок соответствует исполнению УХЛ1 по ГОСТ 15150-69.

Степень защиты, обеспечиваемая оболочкой – IP68 по ГОСТ 14254-96.

По эксплуатационной законченности блок ESD-VCX относится к изделиям третьего порядка по ГОСТ 12997-84\*.

Конструкция и установочные размеры блока обеспечивают установку его в прямоходовые, многооборотные и неполноповоротные электроприводы серии ГУСАР и др. В составе электропривода блок обеспечивает выполнение следующих функций:

открытие, закрытие и точная остановка в промежуточном положении запорного органа арматуры;

отключение электродвигателя при превышении заданных крутящих моментов;

поиск максимальной скорости перекрытия арматуры;

программируемая диаграмма задания скорости перемещения и максимальных крутящих моментов;

контроль сопротивления изоляции между фазами и корпусом электродвигателя;

измерение положения выходного звена электропривода независимо от наличия электропитания;

полный пакет интеллектуальных защит (от заклинивания запорного органа, провалов напряжения, неправильного подключения электродвигателя, короткого замыкания в нагрузке, время-токовая защита);

автоматическую самодиагностику;

работу при обрыве одной фазы питающей сети;

дистанционное управление по последовательному (RS-485) или дискретному интерфейсу (220 В AC, 24 В DC);

конфигурируемый набор сигналов дискретного интерфейса;

блокировка от несанкционированного управления и изменения параметров;

фиксация основных событий блока (команды, аварии, достижение конечных положений) в постоянно-запоминающем устройстве с указанием времени и даты возникновения;

поддержка инфракрасного интерфейса для задания параметров и считываний журнала событий;

управление по аналоговому входу [4].

Основные технические характеристики блока приведены в таблице 1.

**Таблица 1 – Основные технические характеристики**

Наименование параметра	Ед. изм.	Значение
Мощность подключаемого электродвигателя	кВт	0,09-0,55
Мощность, потребляемая в дежурном режиме при включенном подогревателе, не более	Вт	300
Диапазон рабочих напряжений	В	380 <sup>+30%</sup> <sub>-40%</sub>
Рабочий диапазон встроенного датчика положения	об. вала датчика положения	65536
Погрешность встроенного датчика положения, не более	об. вала датчика положения	±1

**Таблица 1 – Основные технические характеристики**

Наименование параметра	Ед. изм.	Значение
Погрешность ограничения крутящего момента на выходном звене электропривода от заданного значения в диапазоне от 20 до 49 %, не более	%	±20
Погрешность ограничения крутящего момента на выходном звене электропривода от заданного значения в диапазоне от 50 до 100 %, не более	%	±10
Диапазон регулирования частоты вращения электродвигателя (максимальная частота вращения не более 3000 оборотов в минуту)	%	от 20% до 200%,
Время готовности блока после подачи питания, не более		
– при температуре ниже минус 20 °С	мин	20
– при температуре выше минус 20 °С	мин	1
Степень защиты, обеспечиваемая оболочкой по ГОСТ 14254-96		IP68
Наработка на отказ	цикл	3000
Среднее время восстановления	ч	2
Габаритные размеры блока, не более		315×178×40
	мм	0
Масса блока, не более	кг	12
Назначенный срок хранения	лет	3
Назначенный срок службы до списания	лет	30
Сечение подключаемых проводников цепей силового питания 380 В и электродвигателя	мм <sup>2</sup>	от 1,0 до 6,0
Сечение подключаемых проводников для резервного питания, цепей управления, сигнализации и индикации	мм <sup>2</sup>	от 0,2 до 2,5



Параметры устройства ввода-вывода приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры устройства ввода-вывода

Вид сигнала	кол-во	Обозначение	Характеристика сигнала
Дискретные входы (220 В/50 Гц)	3	ОТКРЫТЬ, ЗАКРЫТЬ, СТОП	Переменный ток частотой 49-51 Гц; – уровень логической "1" – от 140 до 250 В; – уровень логического "0" – от 0 до 80 В. Входной ток – не более 15 мА
Дискретные входы 24 В	3	ОТКРЫТЬ, ЗАКРЫТЬ, СТОП	Напряжение постоянного тока: – уровень логической "1" – от 18 до 36 В; – уровень логического "0" – от 0 до 8 В. Входной ток – не более 15 мА
Дискретный выход типа "Сухой контакт"	9	ОТКРЫТО, ЗАКРЫТО, МУФТА, АВАРИЯ, ОТКРЫВАЕТСЯ, ЗАКРЫВАЕТСЯ, МУ/ДУ, БЛОК ВКЛЮЧЕН, ПИТАНИЕ ТС	Переменный ток частотой 49-51 Гц и постоянный ток, Напряжение – до 250 В, Сила тока – до 1 А
Аналоговый вход	1	ЗАДАНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	Постоянный ток – 4-20 мА
Аналоговый выход	1	ПОЛОЖЕНИЕ	Постоянный ток – 4-20 мА

Рассмотрим устройство блока.

Принцип действия блока поясняет функциональная схема, представленная на рисунке 6.

Блок состоит из следующих узлов:

- В – трехфазный выпрямитель;
- ВИП – вторичный источник питания;
- БЗ – блок защиты;
- ДТ – датчик температуры;
- НЭ – нагревательный элемент;
- ИН – силовой инвертор;
- МКУ – микропроцессорный контроллер управления;
- МПУ – местный пост управления;
- ДП – датчик положения;
- БИ – блок индикации;
- RS-485 – интерфейс RS-485;
- БТМ – блок телемеханики;
- ИК – инфракрасный интерфейс.

Трехфазный выпрямитель предназначен для преобразования входного переменного трехфазного напряжения 380 В в постоянное напряжение 537 В для питания силового инвертора.

Вторичный источник питания предназначен для преобразования переменного напряжения 380 В в напряжение питания электронных узлов схемы.

Блок защиты защищает цепи телемеханики от превышений напряжения.

Датчик температуры производит контроль температуры корпуса силового инвертора для работы электронной защиты от пониженной и повышенной температуры.

Нагревательный элемент установлен на основании, на котором размещен силовой инвертор и предназначен для его предварительного прогрева до температуры не менее минус 10 °С при работе блока ESD-VCX при более низкой температуре.

Силовой инвертор предназначен для преобразования постоянного напряжения 537 В в переменное трехфазное напряжение заданной частоты и амплитуды, необходимое для обеспечения требуемого режима работы электродвигателя.

Микропроцессорный контроллер управления обеспечивает управление работой силового инвертора, обмен с системой телемеханики по последовательному и дискретному интерфейсам, работу с местным постом управления (далее – МПУ) и инфракрасным интерфейсом (далее – интерфейс ИК). Контроллер производит анализ текущих параметров блока (токов, напряжений, положения выходного звена) и команд местного и дистанционного управления, формирует управляющие воздействия на силовой инвертор, определяет возникновение аварийных режимов блока, выдает информационные и аварийные сообщения в интерфейс связи с дискретной телемеханикой, по RS-485 или интерфейс ИК и на индикатор блока.

Датчик положения предназначен для контроля текущего углового положения вала электропривода и обеспечивает возможность управления перемещением выходного звена электропривода в заданное положение.

Блок индикации предназначен для индикации текущего режима работы электропривода, аварийных сигналов, а также вывода параметров управления электроприводом для их контроля и изменения обслуживающим персоналом.

Интерфейс RS-485 предназначен для связи с системой телемеханики по последовательному интерфейсу. Обмен информацией производится по протоколу ModBus RTU. Интерфейс ИК предназначен для связи по инфракрасному интерфейсу. Обмен информации производится по протоколу ModBus RTU.

Блок телемеханики предназначен для управления работой блока ESD-VCX с помощью команд телеуправления (далее – ТУ) и контроля состояния и режимов работы блока ESD-VCX с помощью телесигнализации (далее – ТС)

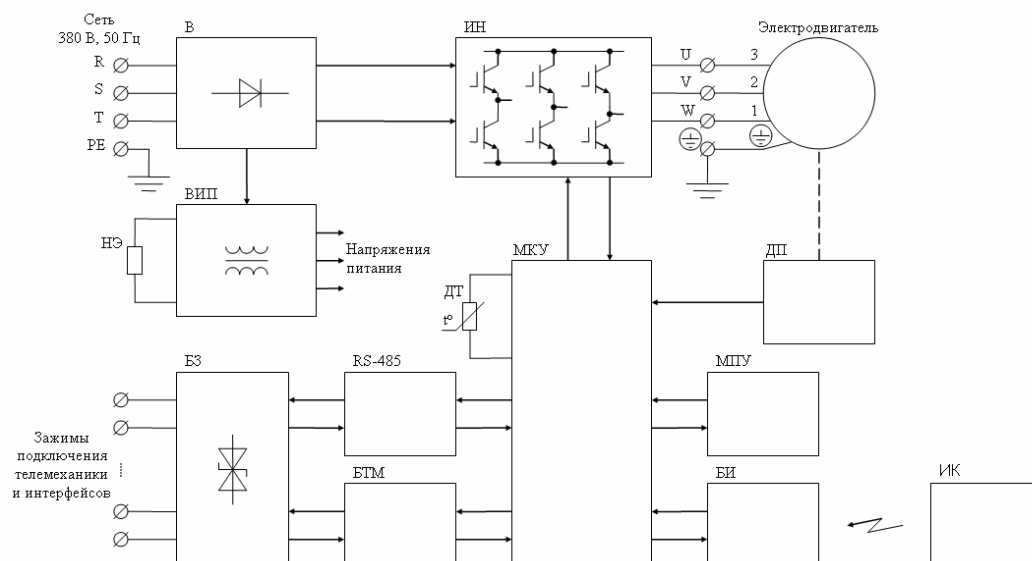


Рисунок 6 – функциональная схема блока при работе в составе электропривода

### Общее описание алгоритма работы блока

При подаче команды на движение блок начинает формировать напряжение на обмотку статора электродвигателя. При этом развиваемый момент трогания электропривода ограничен уровнем, заданным пользователем. Если момент сопротивления нагрузки меньше чем развиваемый электроприводом крутящий момент, то вал электродвигателя начинает вращаться.

Если движение отсутствует (момент сопротивления нагрузки больше заданного), то, отработав "на упор" заданное пользователем время, блок обесточивает электродвигатель и выдает сигнал аварии **"НЕТ ДВИЖЕНИЯ"** (за исключением режима "Уплотнение" при полностью калиброванном датчике положения).

Диаграмма работы блока в составе электропривода показана на рисунке 7. При достижении конечного положения блок останавливает электропривод и выдает сигнал о достижении конечного положения. Зона останова, в которой

выставляется сигнал достижения конечного положения, может быть настроена пользователем.

Если заданы оба конечных положения, то становится возможным разбить траекторию движения на три участка (зона "Закрыто", зона "Открыто" и зона "Движение"), в каждом из которых возможно индивидуально задавать скорость движения и величину максимального крутящего момента.

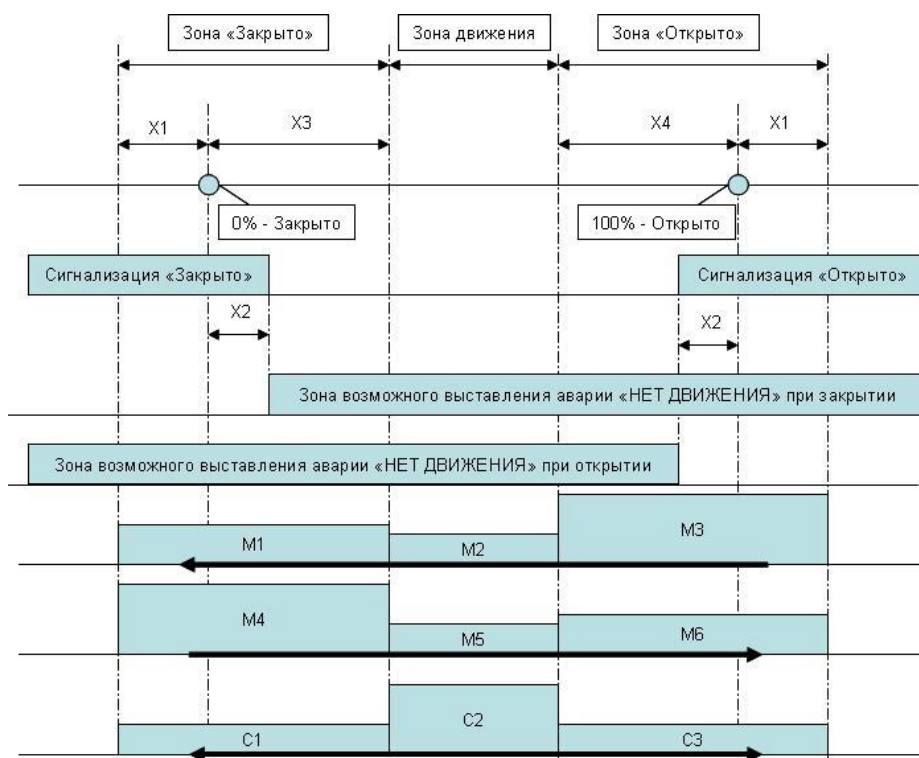


Рисунок 7 – диаграмма работы блока в составе электропривода

$X1$  – максимально допустимое для отработки расстояние при работе в режиме "Уплотнение".  $X1=10$  – количество оборотов рабочего звена запорного органа (выходного звена электропривода).

$X2$  – расстояние, обеспечивающее гистерезис срабатывания конечных выключателей. Устанавливается пользователем.

$X3$  – зона "Закрыто", задаваемая пользователем в процентах от перемещения между конечными положениями. Устанавливается пользователем.

X4 – зона "Открыто", задаваемая пользователем в процентах от перемещения между конечными положениями. Устанавливается пользователем.

M1 – момент уплотнения в положении "Закрыто". Устанавливается пользователем.

M2 – момент движения при закрытии. Устанавливается пользователем.

M3 – момент трогания из положения "Открыто". Устанавливается пользователем.

M4 – момент трогания из положения "Закрыто". Устанавливается пользователем.

M5 – момент движения при открытии. Устанавливается пользователем.

M6 – момент уплотнения в положении "Открыто". Устанавливается пользователем.

C1 – скорость в зоне "Закрыто" при открытии и закрытии. Устанавливается пользователем.

C2 – скорость в зоне движения при открытии и закрытии. Устанавливается пользователем.

C3 – скорость в зоне "Открыто" при открытии и закрытии. Устанавливается пользователем.

Сигнализация "Закрыто" - выставление сигнализации на дискретном и последовательном интерфейсе, а также на единичных индикаторах МПУ о достижении состояния "Закрыто".

Сигнализация "Открыто" - выставление сигнализации на дискретном и последовательном интерфейсе, а также на единичных индикаторах МПУ, о достижении состояния "Открыто".

Блок позволяет работать в режиме "Уплотнение" для обеспечения максимальной герметичности арматуры или максимального открытия арматуры. В этом режиме при достижении конечного положения блок выдает

сигнализацию достижения конечного положения и продолжает движение до того момента, когда момент сопротивления нагрузки превысит крутящий момент электропривода, задаваемый пользователем. При этом происходит останов без выдачи аварийного сигнала о превышении момента сопротивления нагрузки. Данный режим может применяться для положений "Закрыто" и/или "Открыто".

Снижение/перекус напряжения питающей сети до 120 В фазного напряжения ведет к пропорциональному снижению скорости при работе на больших крутящих моментах и не является причиной для останова блоком электропривода.

Все аварии, команды и изменение состояния электропривода ("Стоп", "Движение" и др.) фиксируются в журнале событий с записью времени и даты возникновения события. Также фиксируются напряжения фаз входной питающей сети, значение развиваемого крутящего момента и текущее положение выходного звена электропривода. Кроме того, блок позволяет фиксировать крутящий момент в зависимости от текущего положения при движении электропривода. Количество зафиксированных событий – 630 с циклическим обновлением.

Конечные положения "Закрыто" и "Открыто" могут быть заданы четырьмя способами:

- прямым заданием конечных положений (электропривод перемещает запорный орган в любую точку, и эта точка назначается ему как конечное положение, затем электропривод перемещает запорный орган в другую точку, и ему эта точка назначается как второе конечное положение);
- заданием приблизительного количества оборотов рабочего звена запорного органа (выходного звена электропривода), которые необходимо выполнить электроприводу, чтобы достигнуть положения "Открыто";
- заданием приблизительного количества оборотов рабочего звена запорного органа (выходного звена электропривода), которые необходимо выполнить электроприводу, чтобы достигнуть положения "Закрыто";
- запуском автоматической калибровки датчика положения, при котором блок самостоятельно определяет крайние положения "Открыто" и "Закрыто".

### **3. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ**

#### **3.1 ВОЗМОЖНОСТИ ПАКЕТА MATLAB**

В данной работе моделирование электропривода, реализующий векторный метод управления, осуществляется с помощью средства визуального моделирования SIMULINK, входящего в более универсальный пакет MATLAB. Этот пакет наиболее близко подходит для моделирования частотно-регулируемого асинхронного электропривода, по сравнению с другими компьютерными программами, что связано с его рядом достоинств, речь о которых пойдет ниже.

Одним из основных достоинств пакета MATLAB является то, что для работы пользователю достаточно узнать о нем ровно столько, сколько требует решаемая задача. Если же решаемая задача требует создание каких-либо специальных инструментов, MATLAB предоставляет в распоряжение пользователя практический универсальный язык объектно-ориентированного программирования в сочетании с различными средствами отладки создаваемых программ. Структура данного пакета позволяет эффективно сочетать основные подходы к созданию модели: аналитический и имитационный.

Именно в среде математического моделирования MATLAB позволяет наиболее полно использовать все современные достижения компьютерных технологий, а так же возможности обмена данными через Internet. MATLAB позволяет создать пользователю собственный графический интерфейс, отвечающий как его вкусам так, так и требованиям решаемой задачи. Как следует из названия пакета, он ориентирован в первую очередь на обработку массивов данных (матриц и векторов), что позволяет повысить эффективность процедур, работающих с указанными типами данных, по сравнению с языками программирования “общего назначения” (Pascal; C++).



С точки зрения пользователя, MATLAB представляет собой богатейшую библиотеку функций (например, в MATLAB 6.1 их около 1000). Для облегчения поиска библиотека функций разбита на разделы. Те из них, которые носят общий характер, входят в состав ядра данного пакета. Другие функции, относящиеся к конкретной области, включены в состав специальных разделов. В данный пакет входят как стандартные средства: решение дифференциальных и алгебраических уравнений, так и нетрадиционные, способные претендовать на определенную уникальность в своем роде: средства цифровой обработки изображений, поиск решений на основе нечеткой логики и т.д. Кроме того, имеются средства взаимодействия с популярными офисными продуктами компаний Microsoft – Word и Excel. Основное место среди наборов инструментов занимает система визуального моделирования Simulink. Следует отметить, что хотя изложение материала ориентировано на работу в среде Windows, система MATLAB не зависит от платформы и может работать под управлением других операционных систем, к примеру, Unix. Разработка моделей средствами SIMULINK основана на технологии drag and drop (перетаски и оставь). В качестве кирпичиков для построения моделей по средствам SIMULINK используются модули, хранящиеся в соответствующей библиотеке. Библиотека SIMULINK хороша тем, что с одной стороны, обеспечивает пользователю доступ ко всем основным возможностям пакета MATLAB, а с другой является достаточно самостоятельной его компонентой. Блоки, включаемые в создаваемую модель, могут быть связаны друг с другом, как по информации, так и по управлению. Тип связи зависит от типа блока и логики работы моделей. Данные, которыми обмениваются блоки, могут быть скалярными величинами, векторами, или матрицами произвольной размерности. Любая модель может иметь иерархическую структуру, т.е. состоять из более низкого уровня, причем число уровней иерархии практически не ограничено. Наряду с другими параметрами моделирования пользователь может задавать способ изменения модельного времени (с постоянным и переменным шагом) а так же условие окончания моделирования в ходе

моделирования имеется возможность наблюдать за процессами, происходящими в системе. Для этого используются специальные «смотровые окна». Интересующие пользователя характеристики системы могут быть представлены как в числовой, так и в графической форме. Существует возможность включения в состав средств анимации.

Еще одно важное достоинство библиотеки Simulink заключается в том, что она является открытой системой: состав библиотеки может быть пополнен пользователем за счет разработки собственных блоков. Библиотека блоков SIMULINK представляет набор визуальных объектов, используя которые можно собирать, как из кубиков, произвольную конструкцию. Практически для всех блоков существует возможность индивидуальной настройки: пользователь может изменить как внутренние параметры блоков (например, количество входов), так и внешнее оформление (цвет, размеры). На порядок соединения блоков не накладывается никаких ограничений, но необходимо соблюдать ряд правил, обусловленных в основном логикой работы самой модели, а не специальными требованиями SIMULINK.

## **3.2 РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

### **3.2.1 Описание построения имитационной модели АД при использовании неподвижной системы координат и построение переходных процессов в режиме пуска асинхронной машины.**

Для построения имитационной модели необходимо принять определённый уровень идеализации свойств АД и ПЧ. В теории электропривода переменного тока общепринятыми допущениями принято считать следующее:

1. Не учитываются потери в стали.
2. Рассматриваем трёхфазный симметричный режим работы.

3. Насыщение магнитной цепи АД не учитывается.
4. Принимаем напряжения на выходе ПЧ строго синусоидальной формы.
5. Пренебрегаем влиянием силового канала между АД и ПЧ.

На основании законов Кирхгофа и Фарадея для цепей статора и ротора можно записать уравнения:

За основу проектирования можно принять классическую «Т-образную» схему замещения АД,

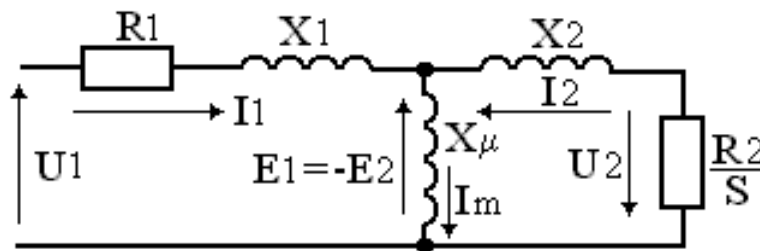


Рисунок 8 - Схема замещения асинхронного двигателя

Теперь согласно этой схеме рассмотрим процессы, которые описывают эту модель АД, при этом будем использовать систему следующих векторных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned}
 U_s &= R_s I_s + \frac{d\psi_s}{dt} \\
 U_r &= R_r I_r + \frac{d\psi_r}{dt} \\
 \psi_s &= L_s I_s + L_m I_r \\
 \psi_r &= L_r I_r + L_m I_s \\
 M &= \frac{3}{2} z_p (\psi_s \times I_s) \\
 \frac{d\omega_r}{dt} &= \frac{1}{J} (M - M_c)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Здесь  $U_s, U_r, I_s, I_r, \psi_s, \psi_r$  – двухэлементные векторы напряжений, токов и потокосцеплений, представленные в ортогональной (двухфазной) системе координат в виде составляющих по координатным осям. Механические параметры системы представлены следующими переменными:  $J$  – момент

инерции,  $\omega_r$  – частота вращения ротора,  $z_p$  – число пар полюсов АД,  $M$  и  $M_c$  – электромагнитный момент и момент нагрузки. Вспомогательная матричная константа  $j$  служит для «переворота» компонентов векторных переменных и позволяет упростить форму записи системы уравнений.

С точки зрения математических формул можно записать следующее:

$$\begin{aligned} U_s &= \begin{bmatrix} u_{s\alpha} \\ u_{s\beta} \end{bmatrix}, & U_r &= \begin{bmatrix} u_{r\alpha} \\ u_{r\beta} \end{bmatrix}, & I_s &= \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix}, & I_r &= \begin{bmatrix} i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix}, \\ \Psi_s &= \begin{bmatrix} \psi_{s\alpha} \\ \psi_{s\beta} \end{bmatrix}, & \Psi_r &= \begin{bmatrix} \psi_{r\alpha} \\ \psi_{r\beta} \end{bmatrix}, & j &= \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (2)$$

В нашем случае индексы « $\alpha$ » и « $\beta$ » будут соответствовать компонентам вектора в неподвижной системе координат. В дальнейшем, компонентам вектора во вращающейся системе координат соответствуют индексы « $x$ » и « $y$ ».

Реальная асинхронная машина имеет 3 фазы, а будем моделировать двухфазную модель, и поэтому для того чтобы осуществить переход между составляющими векторов в двухфазных координатах и трёхфазной координатной системы используются формулы преобразования Кларка (Clarke Transform).

На примере преобразования вектора тока статора  $I_s$ , рассмотрим связь между составляющими в двухфазных координатах и трёхфазной системой. Рисунок 9 поясняет данное преобразование графически. Для остальных переменных преобразования будут идентичными.

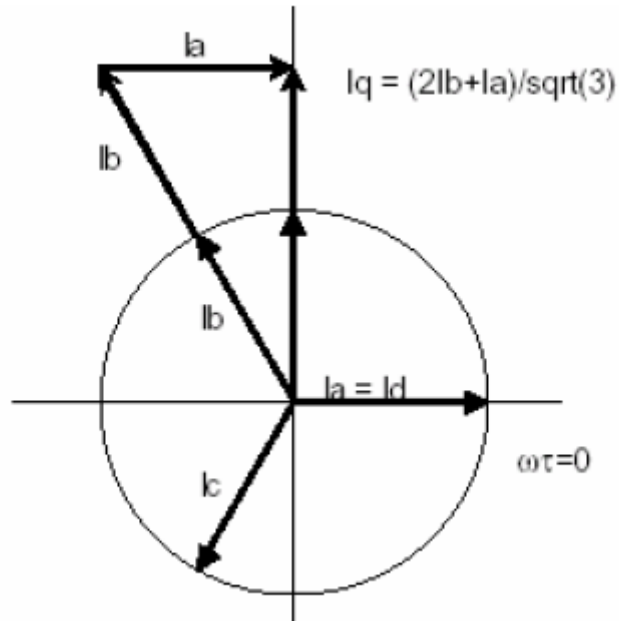


Рисунок 9. Преобразование Кларка (Clarke Transformation)  
(из трёхфазной системы координат в двухфазную)

$$i_{s\alpha} = i_{s\alpha} \quad i_{s\beta} = \frac{(2i_{sb} + i_{sa})}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

где  $i_{s\alpha}$   $i_{s\beta}$  — составляющие вектора тока статора  $I_s$  представленные в двухфазной неподвижной системе координат;

$i_{s\alpha}$   $i_{s\beta}$   $i_{sc}$  — фазные токи статора АД представленные в симметричной трёхфазной системе

Формула для обратного преобразования образуется из (3) после выполнения соответствующих математических преобразований.

Система уравнений (1) большое количество неизвестных и для уменьшения их числа, выполним следующую подстановку.

Зададимся целью исключить из системы уравнений переменные  $\psi_s$  и  $I_r$ , оставив  $\psi_r$  и  $I_s$ . Для этого из третьего и четвертого уравнений системы (1) выразим  $I_r$ :

$$I_r = \frac{\Psi_s - L_s \cdot I_s}{L_m}, \quad I_r = \frac{\Psi_r - L_m \cdot I_s}{L_r}. \quad (4)$$

Приравнивая обе части выражений, получаем:

$$\Psi_s - L_s \cdot I_s = \frac{L_m}{L_r} (\Psi_r - L_m \cdot I_s), \text{ из которого теперь выделяем } \Psi_s,$$

$$\Psi_s = \frac{L_m}{L_r} \Psi_r + \left( L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot I_s.$$

(5)

После этого в первое уравнение системы (1) подставляем выражение для  $\Psi_s$ , (5):

$$U_s = R_s I_s + \frac{d\Psi_s}{dt} = R_s I_s + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\Psi_r}{dt} + \left( L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot \frac{dI_s}{dt}.$$

(6)

Во второе уравнение системы (1) подставляем  $I_r$ ,:

$$\begin{aligned} U_r &= R_r I_r + \frac{d\Psi_r}{dt} - j\omega_r z_p \Psi_r = \\ &= R_r \left( \frac{\Psi_r - L_m \cdot I_s}{L_r} \right) + \frac{d\Psi_r}{dt} - j\omega_r z_p \Psi_r = \\ &= \frac{d\Psi_r}{dt} - j\omega_r z_p \Psi_r + R_r \frac{\Psi_r}{L_r} - R_r \frac{L_m}{L_r} I_s = \\ &= \frac{d\Psi_r}{dt} - \left( j\omega_r z_p - \frac{R_r}{L_r} \right) \Psi_r - R_r \frac{L_m}{L_r} I_s. \end{aligned}$$

(7)

Из (7) получаем выражение для  $\frac{d\Psi_r}{dt}$  и подставляем в (6):

$$\begin{aligned}
U_s &= R_s I_s + \frac{L_m}{L_r} \frac{d\Psi_r}{dt} + \left( L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot \frac{dI_s}{dt} = \\
&= R_s I_s + \frac{L_m}{L_r} U_r + \frac{L_m}{L_r} \left( j\omega_r z_p - \frac{R_r}{L_r} \right) \Psi_r + R_r \left( \frac{L_m}{L_r} \right)^2 \cdot I_s + \left( L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot \frac{dI_s}{dt}
\end{aligned} \tag{8}$$

Окончательно приводим уравнение (8) к следующему виду:

$$U_s - \frac{L_m}{L_r} U_r = \left( R_s + R_r \left( \frac{L_m}{L_r} \right)^2 \right) I_s + \frac{L_m}{L_r} \left( j\omega_r z_p - \frac{R_r}{L_r} \right) \Psi_r + \left( L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot \frac{dI_s}{dt} \tag{9}$$

Теперь комбинируем вместе (7) и (9), после чего получаем систему эквивалентную (1), но состоящую только из двух уравнений с двумя неизвестными  $\Psi_r$  и  $I_s$ . Кроме этого, помним о том, что для АД с короткозамкнутым ротором справедливо  $U_r = 0$ :

$$\begin{cases}
U_s = \left( R_s + R_r \left( \frac{L_m}{L_r} \right)^2 \right) I_s + \frac{L_m}{L_r} \left( j\omega_r z_p - \frac{R_r}{L_r} \right) \Psi_r + \left( L_s - \frac{L_m^2}{L_r} \right) \cdot \frac{dI_s}{dt} \\
0 = \frac{d\Psi_r}{dt} - \left( j\omega_r z_p - \frac{R_r}{L_r} \right) \Psi_r - R_r \frac{L_m}{L_r} I_s \\
M = \frac{3}{2} z_p \frac{L_m}{L_r} (\Psi_r \times I_s) \\
\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_c)
\end{cases} \tag{10}$$

Для упрощения записи системы уравнений введём дополнительные коэффициенты и перейдём к операторной форме.

$$\begin{cases} U_s = R_e I_s + K_r j \omega_r z_p \Psi_r - K_r A_r \Psi_r + L_e \cdot p I_s \\ 0 = p \Psi_r - j \omega_r z_p \Psi_r + A_r \Psi_r - R_r K_r I_s \\ M = \frac{3}{2} z_p K_r (\Psi_r \times I_s) \\ p \omega_r = \frac{1}{J} (M - M_c) \end{cases} \quad (11)$$

$$\text{где: } K_r = \frac{L_m}{L_r}, \quad R_e = R_s + R_r \cdot K_r^2, \quad L_e = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}, \quad A_r = \frac{R_r}{L_r}$$

Систему (11) перепишем, выразив производные вектора тока и потокосцепления:

$$\begin{cases} p I_s = \frac{1}{L_e} (U_s - R_e I_s - K_r \omega_r z_p j \Psi_r + K_r A_r \Psi_r) \\ p \Psi_r = R_r K_r I_s - A_r \Psi_r + \omega_r z_p j \Psi_r \\ M = \frac{3}{2} z_p K_r (\Psi_r \times I_s) \\ p \omega_r = \frac{1}{J} (M - M_c) \end{cases} \quad (12)$$

Затем систему векторных уравнений (12) необходимо представить в скалярном виде, подставив вместо векторов  $\Psi_r$  и  $I_s$  их составляющие по координатам. Векторное произведение в выражении для электромагнитного момента раскроем в соответствии с правилами векторной алгебры. С учётом (2) получаем новую систему скалярных уравнений, имеющую следующий вид:



$$\left\{ \begin{array}{l} p i_{s\alpha} = \frac{1}{L_e} (u_{s\alpha} - R_e i_{s\alpha} + K_r \omega_r z_p \psi_{r\beta} + K_r A_r \psi_{r\alpha}) \\ p i_{s\beta} = \frac{1}{L_e} (u_{s\beta} - R_e i_{s\beta} - K_r \omega_r z_p \psi_{r\alpha} + K_r A_r \psi_{r\beta}) \\ p \psi_{r\alpha} = R_r K_r i_{s\alpha} - A_r \psi_{r\alpha} - \omega_r z_p \psi_{r\beta} \\ p \psi_{r\beta} = R_r K_r i_{s\beta} - A_r \psi_{r\beta} + \omega_r z_p \psi_{r\alpha} \\ M = \frac{3}{2} z_p K_r (\psi_{r\alpha} \cdot i_{s\beta} - \psi_{r\beta} \cdot i_{s\alpha}) \\ p \omega_r = \frac{1}{J} (M - M_c) \end{array} \right. \quad (13)$$

Общий вид системы уравнений (13) является наиболее подходящим для моделирования динамических режимов работы АД. Выбирая способ для решения системы дифференциальных уравнений, следует отдавать предпочтение численным методам высших порядков. Задача решения системы уравнений может быть также успешно решена с использованием средств структурного моделирования (Simulink). На рисунке представлена структурная схема имитационной модели АД, созданная на базе системы дифференциальных уравнений (1).

Выполняя исследования, следует помнить о двухфазной природе данной модели. Входные напряжения  $U_{s\alpha}$  и  $U_{s\beta}$  формируются с учётом преобразований Кларка (Clarke Transformation) (3) и рассчитываются на базе мгновенных фазных значений напряжений из 3-х фазной системы. Соответственно для наблюдения за фазными токами необходимо выполнить обратное преобразование, взяв за основу мгновенные значения  $i_{s\alpha}$  и  $i_{s\beta}$ .

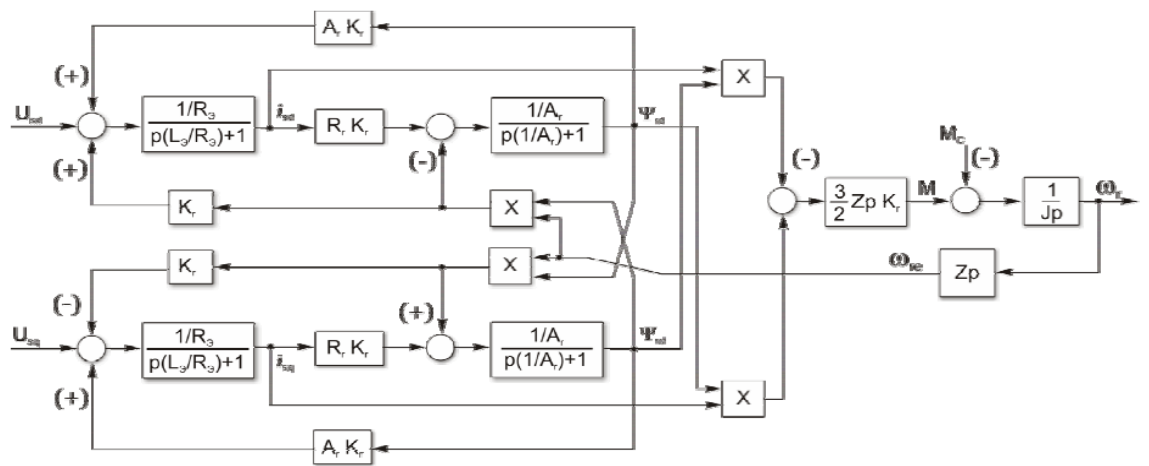


Рисунок 10 - Структурная схема имитационной модели АД при использовании неподвижной системы координат

На рисунке 11 представлена имитационная модель двухфазной модели АД созданного в приложении Simulink из пакета Matlab.

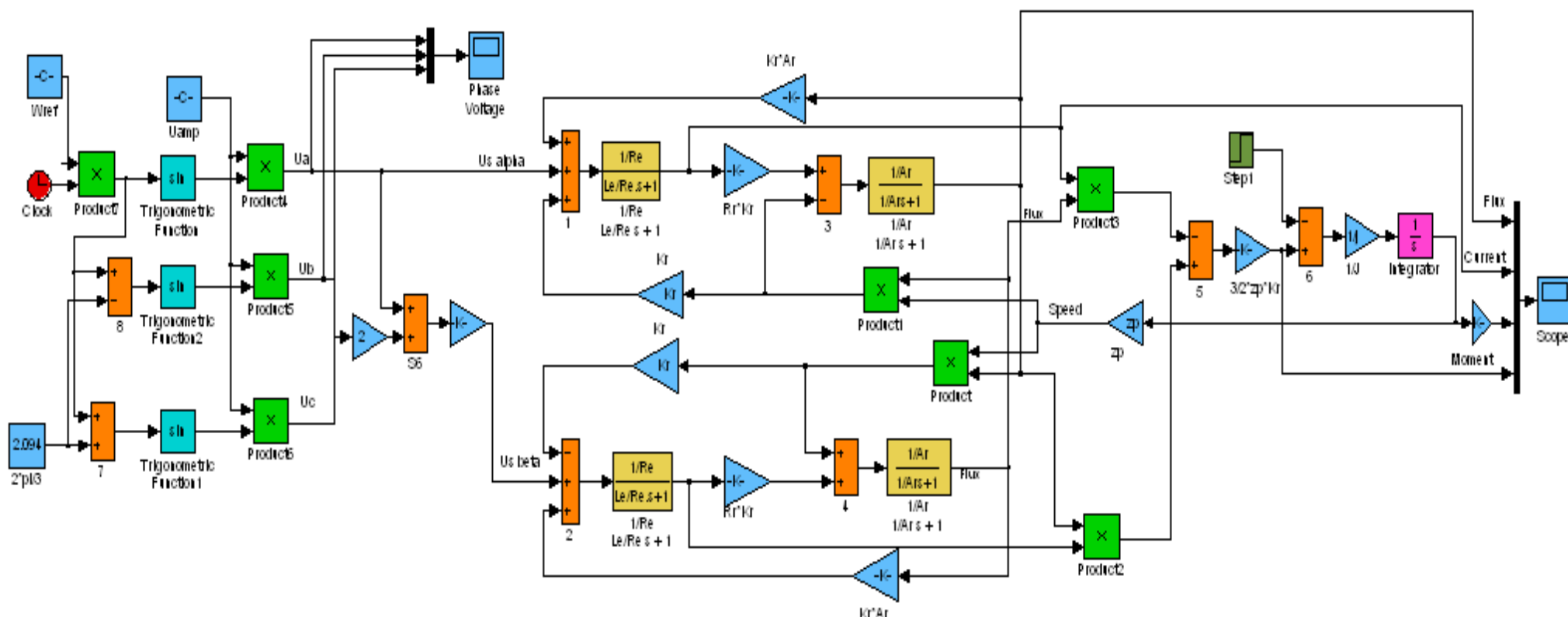


Рисунок 11 - Структурная схема имитационной модели АД в неподвижной системе координат

Перед началом моделирования необходимо рассчитать параметры АД по следующей методике:

### 3.2.2 Асинхронный взрывозащищенный двигатель ДАТ – I56М – 02

- номинальная мощность  $P_H = 0.25$  кВт;
- номинальное линейное напряжение  $U_{HL} = 380$  В;
- номинальное фазное напряжение  $U_{1H} = 220$  В;
- синхронная скорость вращения  $n_0 = 1500$  об/мин;
- номинальное скольжение  $s_H = 0,067$  о.е.;
- коэффициент полезного действия в режиме номинальной мощности  $\eta_H = 65\%$ ;
- коэффициент мощности в режиме номинальной мощности  $\cos \varphi_H = 0,5$  о.е.;
- кратность пускового тока  $I_{\Pi}/I_{1H} = k_i = 6$  о.е.;
- кратность пускового момента  $M_{\Pi}/M_H = k_{\Pi} = 2.9$  о.е.;
- кратность максимального момента  $M_{\max}/M_H = k_{\max} = 3$  о.е.;
- кратность минимального момента  $M_{\min}/M_H = k_{\min} = 2.7$  о.е.,

Ток холостого хода асинхронного двигателя можно найти из выражения:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - [p_* I_{1H} (1 - s_H) / (1 - p_* s_H)]^2}{1 - [p_* (1 - s_H) / (1 - p_* s_H)]^2}},$$

$$I_{1H} = \frac{P_H}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_H \cdot \eta_H} = \frac{250}{3 \cdot 220 \cdot 0,5 \cdot 0,65} = 1.166, \text{ А - номинальный ток}$$

статора двигателя;

$$s_H = \frac{(n_0 - n_H)}{n_0} - \text{номинальное скольжение;}$$

$n_0$  – синхронная частота вращения;

$U_{1H}$  – фазное напряжение;

$$I_{11} = \frac{p_* \cdot P_H}{3 \cdot U_{1H} \cdot \cos \varphi_{p_*} \cdot \eta_{p_*}} = \frac{0,75 \cdot 250}{3 \cdot 220 \cdot 0,421 \cdot 0,65} = 1,037, \text{ А – ток статора}$$

двигателя при частичной нагрузке;

$\cos \varphi_{p_*} = 0,421$  о.е. – коэффициент мощности при частичной нагрузке;

$\eta_{p_*} = \eta_H$  – к.п.д. при частичной нагрузке;

$p_* = P/P_H = 0,75$  – коэффициент загрузки двигателя.

Определим ток холостого хода асинхронного двигателя:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - [p_* I_{1H} (1 - s_H) / (1 - p_* s_H)]^2}{1 - [p_* (1 - s_H) / (1 - p_* s_H)]^2}} =$$

$$= \sqrt{\frac{1,037^2 - [0,75 \cdot 1,166 \cdot (1 - 0,067) / (1 - 0,75 \cdot 0,067)]^2}{1 - [0,75 \cdot (1 - 0,067) / (1 - 0,75 \cdot 0,067)]^2}} = 0,86 \text{ А};$$

Из формулы Клосса определим выражение для расчета критического скольжения:

$$s_k = s_H \cdot \frac{k_{\text{MAX}} + \sqrt{(k_{\text{MAX}})^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta (k_{\text{MAX}} - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta (k_{\text{MAX}} - 1)} =$$

$$= 0,067 \cdot \frac{3 + \sqrt{3^2 - (1 - 2 \cdot 0,067 \cdot 1 \cdot (3 - 1))}}{1 - 2 \cdot 0,067 \cdot 1 \cdot (3 - 1)} = 0,538;$$

$$C_1 = 1 + (I_0 / (2 \cdot k_i \cdot I_{1H})) = 1 + (0,86 / (2 \cdot 6 \cdot 1,166)) = 1,061.$$

Значение коэффициента  $\beta$  находится в диапазоне 0,6 – 2,5 и в первом приближении принимаем  $\beta = 1$ .

Определим коэффициент:

$$A_1 = m U_{1\Phi}^2 (1 - s_H) / (2 \cdot C_1 \cdot k_{\text{MAX}} \cdot P_H) = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,067)}{2 \cdot 1,061 \cdot 3 \cdot 250} = 85,084;$$

Тогда активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора асинхронного двигателя:

$$R_2' = A_1 / (\beta + 1/s_k) C_1 = 85.084 / (1 + \frac{1}{0.538}) \cdot 1.061 = 28.052 \text{ Ом};$$

Определение синхронной скорости

$$\omega_0 = \frac{n_0}{9,55} = \frac{1500}{9,55} = 157.068 \text{ рад/с.}$$

Определение номинальной частоты вращения

$$\omega_n = \omega_0 (1 - s_n) = 157.068 \cdot (1 - 0,067) = 146.544 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$$

Определение номинального момента двигателя

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{250}{146.544} = 1.706 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Определение максимального момента

$$M_{\text{макс}} = k_{\text{макс}} \cdot M_n = 3 \cdot 1.706 = 5.118 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Определение минимального момента

$$M_{\text{мин}} = k_{\text{мин}} \cdot M_n = 2.7 \cdot 1.706 = 4.606 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Определение пускового момента

$$M_{\Pi} = k_{\Pi} \cdot M_n = 2.9 \cdot 1.706 = 4.947 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

### Параметры исследуемого асинхронного двигателя

Используя параметры схемы замещения асинхронной машины, вносим их в нашу модель, которая находится в неподвижной системе координат. При этом графики переходных процессов в режиме пуска будут выглядеть следующим образом [3]:

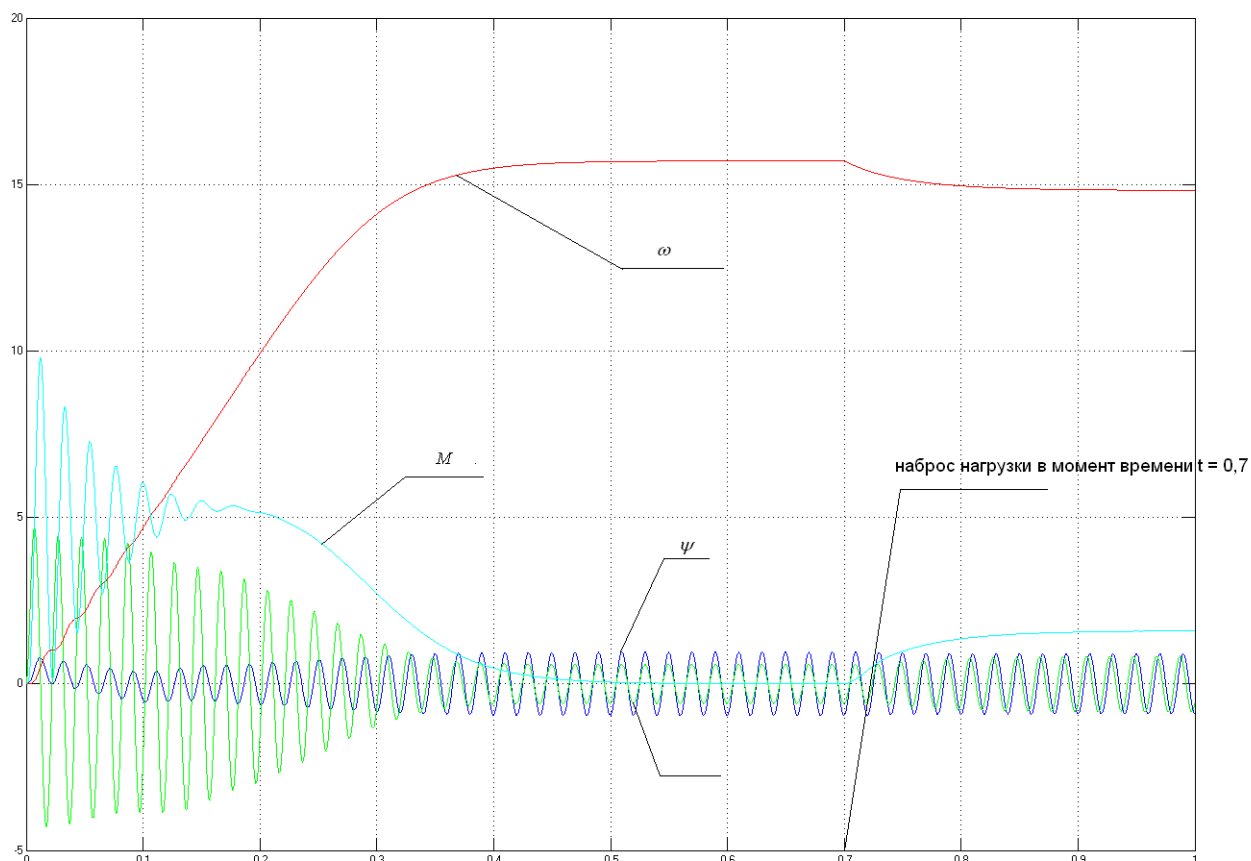


Рисунок 12 - Переходные процессы при пуске и набросе нагрузки асинхронной машины в неподвижной системе координат

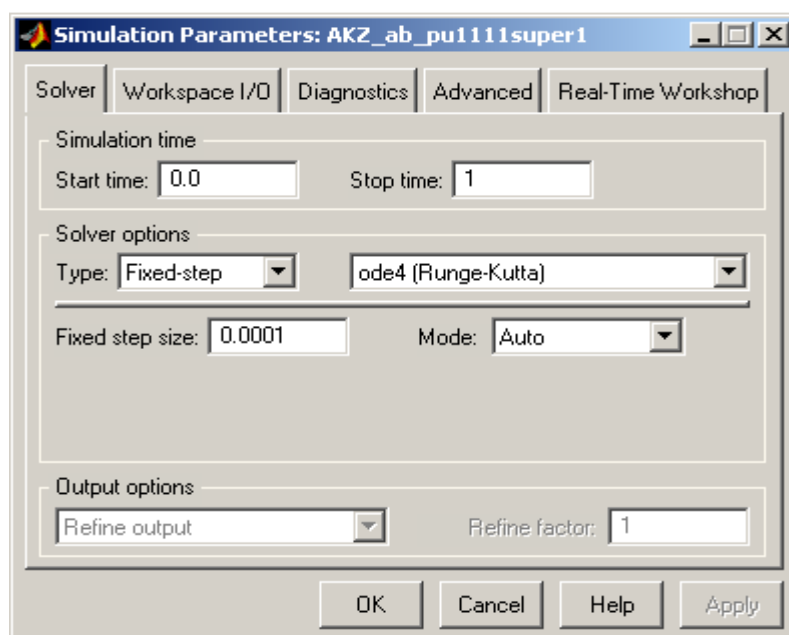


Рисунок 13 - Внешний вид настройки параметров расчета асинхронной машины

### 3.2.3 Описание построения имитационной модели АД во вращающейся системе координат

При рассмотрении случая, когда АД находился в неподвижной системе координат, мы предполагали, что все векторные переменные существуют в неподвижной системе координат, которая жестко связана со статором АД.

Для того чтобы произвести настройку регуляторов в системе векторного управления АД проще всего смоделировать модель АД которая бы находилась во вращающейся системе координат с ориентированной по полю вектора потокосцепления.

В этом случае рассмотрим систему уравнений (11) для случая с произвольной ориентацией координат:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_s = R_s I_s + \frac{d\Psi_s}{dt} + j\omega_r \Psi_s \\ U_r = R_r I_r + \frac{d\Psi_r}{dt} + j(\omega_k - \omega_r) z_p \Psi_r \\ \Psi_s = L_s I_s + L_m I_r \\ \Psi_r = L_r I_r + L_m I_s \\ M = \frac{3}{2} z_p (\Psi_s \times I_s) \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (M - M_c) \end{array} \right. \quad (14)$$

Здесь  $\omega_k$  – скорость произвольно-ориентированной системы координат. Не останавливаясь подробно на выводе системы уравнений, приведём итоговый вариант с учётом параметров индексации компонентов векторов для представления в произвольно-ориентированной координатной системе:



$$\left\{ \begin{array}{l} p i_{sx} = \frac{1}{L_e} (u_{sx} - R_e i_{sx} + K_r A_r \psi_{rx} + K_r \omega_r z_p \psi_{ry} + L_e \omega_k z_p i_{sx}) \\ p i_{sy} = \frac{1}{L_e} (u_{sy} - R_e i_{sy} + K_r A_r \psi_{ry} - K_r \omega_r z_p \psi_{rx} - L_e \omega_k z_p i_{sy}) \\ p \psi_{rx} = R_r K_r i_{sx} - A_r \psi_{rx} + (\omega_k - \omega_r) z_p \psi_{ry} \\ p \psi_{ry} = R_r K_r i_{sy} - A_r \psi_{ry} - (\omega_k - \omega_r) z_p \psi_{rx} \\ M = \frac{3}{2} z_p K_r (\psi_{rx} \cdot i_{sy} - \psi_{ry} \cdot i_{sx}) \\ p \omega_r = \frac{1}{J} (M - M_c) \end{array} \right. \quad (15)$$

Структурная схема, которая соответствует системе (15) приведена на рисунке 17. Основные отличия заключаются в необходимости задания параметра ориентации системы координат  $\omega_k$ . Не следует забывать о том, что при создании имитационной модели АД во вращающейся системе координат векторы входных воздействий должны быть преобразованы и представлены в той же самой системе, где происходит расчёт системы дифференциальных уравнений. Это значит, что вектор напряжения  $U_s$  должен пройти многоступенчатое преобразование.

Во-первых, исходная трёхфазная система напряжений  $u_{sa}$ ,  $u_{sb}$  и  $u_{sc}$  трансформируется с учётом преобразования Кларка (Clarke Transform) в двухфазную с выделением составляющих компонентов  $u_{s\alpha}$  и  $u_{s\beta}$ , характеризующих вектор напряжения  $U_s$  в неподвижной системе координат.

Далее происходит второе преобразование, и компоненты вектора из неподвижной системы преобразуются в систему координат произвольно-ориентированную согласно значению параметра  $\omega_k$ .

Таким образом, получаем компоненты вектора  $u_{sx}$  и  $u_{sy}$ , характеризующие вектор  $U_s$  во вращающейся системе координат. На рисунке 11 показана схема преобразований вектора напряжений  $U_s$ .

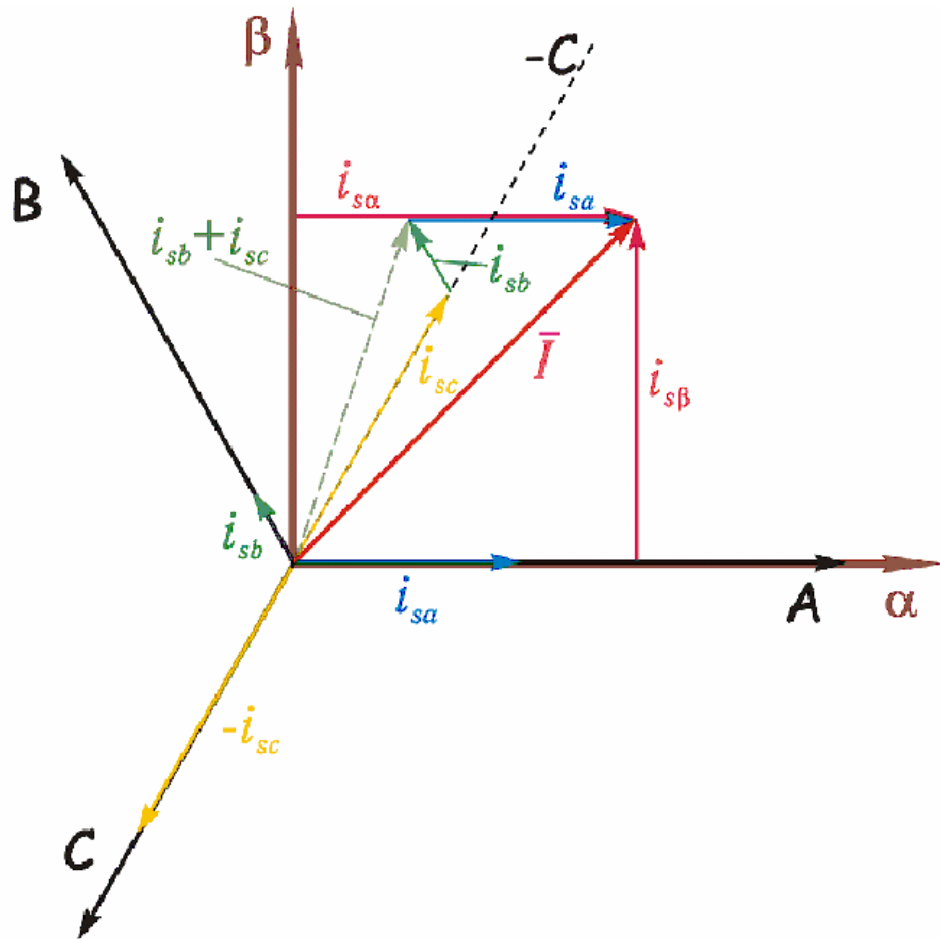


Рисунок 14 - Схема преобразований вектора напряжений  $U_s$

Использование вращающейся координатной системы требует применения специальных преобразований для перехода из одной системы в другую. Различают прямое и обратное координатное преобразование. Такой вид преобразования называется преобразованием Парка (Park Transform)

$$i_{sx} = i_{s\alpha} \cos \theta_k + i_{s\beta} \sin \theta_k$$

$$i_{sy} = -i_{s\alpha} \sin \theta_k + i_{s\beta} \cos \theta_k$$

(16)

где

$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$  — составляющие вектора тока статора  $I_s$  представленные в двухфазной неподвижной системе координат;

$i_{sx}, i_{sy}$  — составляющие вектора тока статора  $I_s$  представленные в двухфазной вращающейся системе координат;

$\theta_k$  — угол поворота координатной системы (угол ориентации).

Параметр  $\theta_k$  связан с угловой скоростью вращения координатной системы  $\omega_k$  благодаря следующему выражению:

$$\frac{d\theta_k}{dt} = \omega_k \text{ или в операторной форме } \frac{1}{p} \omega_k = \theta_k \quad (17)$$

На рисунке 15 представлен файл из программы Simulink, который описывает прямое преобразования координат Парка (Park Transform):

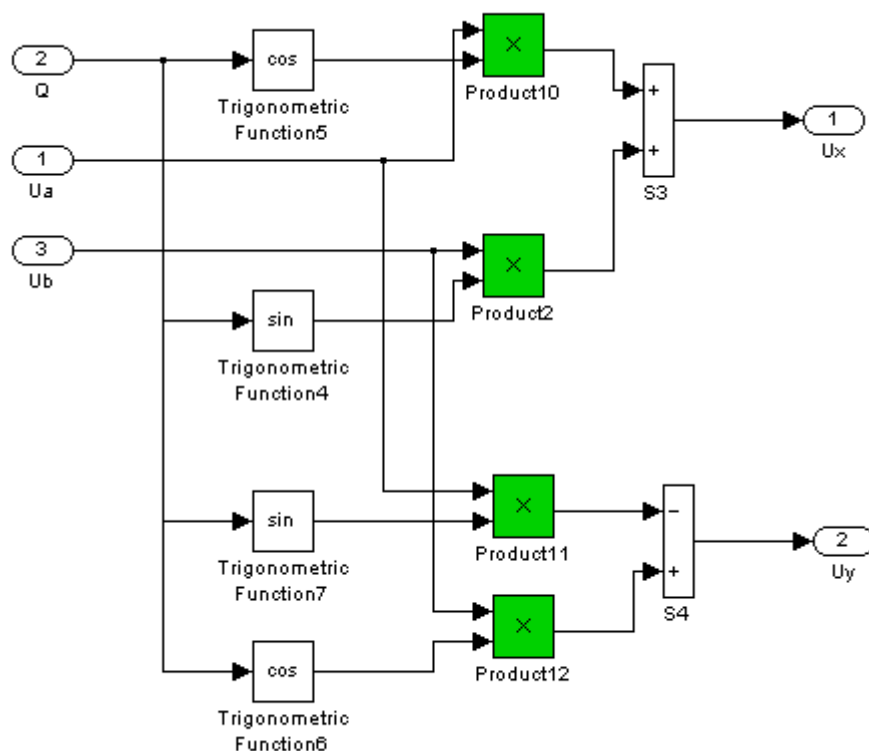


Рисунок 15 - Модель прямого преобразования Парка (Park Transform) в программе Simulink

Обратное преобразование Парка (Inverse Park Transform) используется в том случае когда необходимо перейти из вращающейся системы координат в неподвижную. Тогда математическое выражение для обратного преобразования парка (Inverse Park Transform) будет выглядеть следующим образом.

$$\begin{aligned} i_{s\alpha} &= i_{sx} \cos \theta_k - i_{sy} \sin \theta_k \\ i_{s\beta} &= i_{sx} \sin \theta_k + i_{sy} \cos \theta_k \end{aligned} \quad (18)$$

Это преобразование удобно использовать при исследовании имитационной модели, реализованной во вращающейся координатной системе.

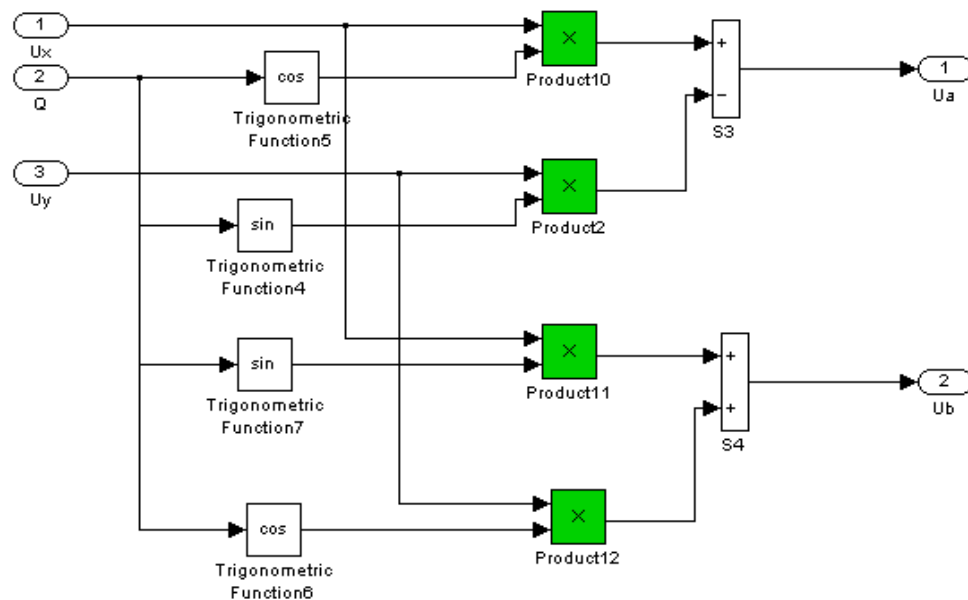


Рисунок 16 - Модель обратного преобразования Парка (Inverse Park Transform) в программе Simulink

При учете всего вышеуказанного структурная схема имитационной модели АД во вращающейся системе координат будет выглядеть так:



Если мы зададимся  $\omega_k = 0$ , то данная схема будет работать аналогично предыдущей.

При этом графики переходных процессов асинхронной машины, находящейся во вращающейся системе координат, в режиме пуска будут выглядеть следующим образом:

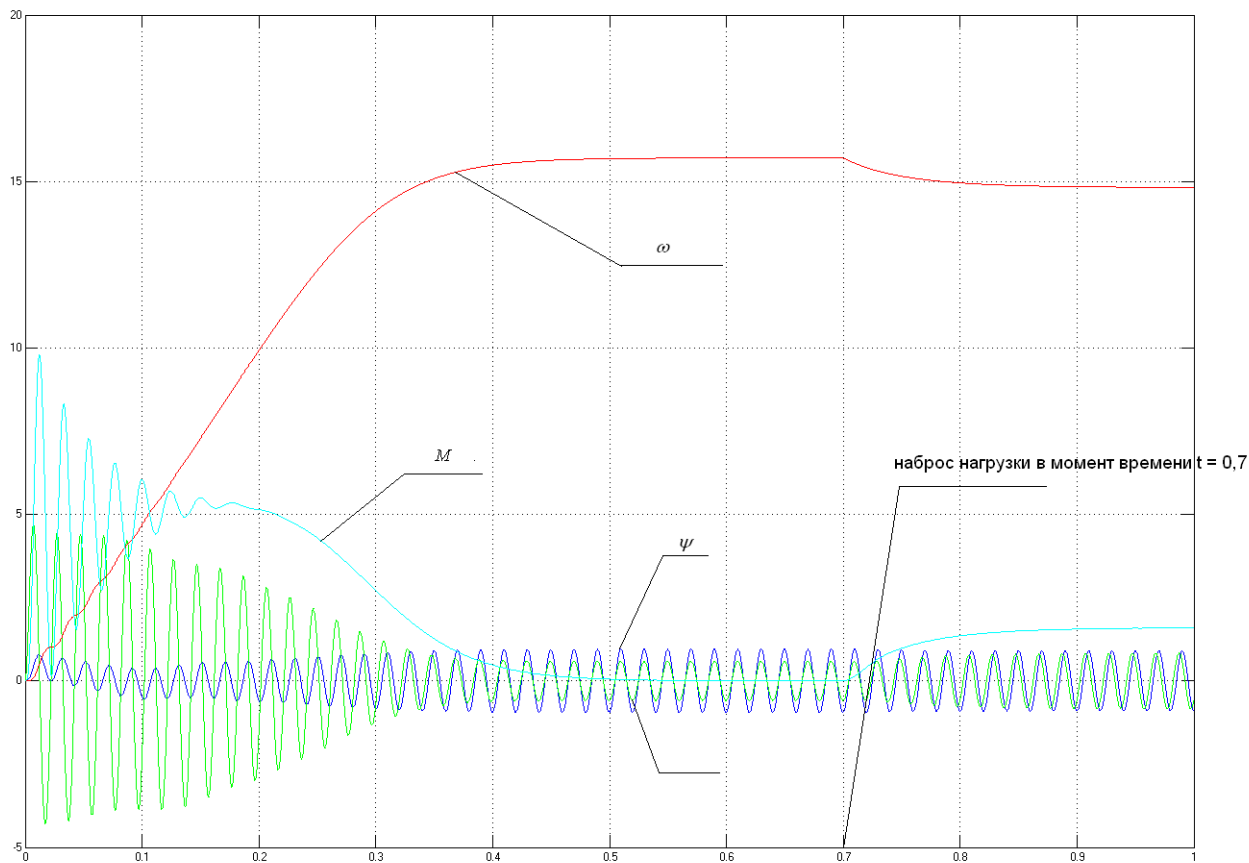


Рисунок 18 - Переходные процессы при пуске и набросе нагрузки асинхронной машины во вращающейся системе координат

При исследовании двух систем координат: неподвижной и вращающейся, можно сделать вывод:

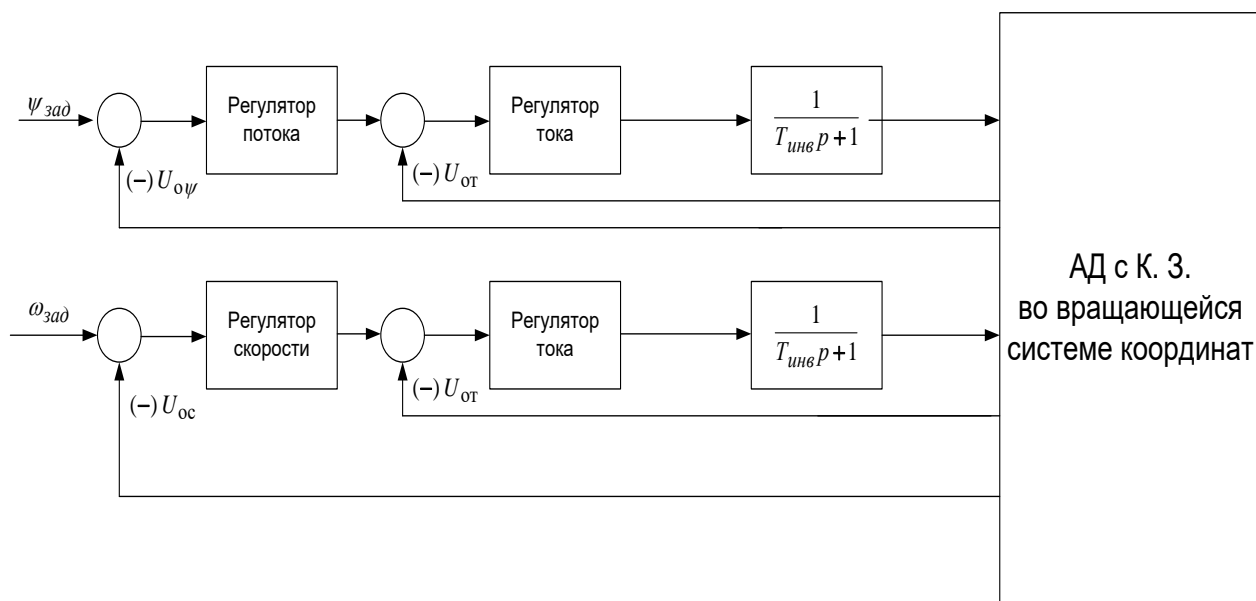
Графики переходных процессов в этих двух системах ничем не отличаются друг от друга.

Имитационная модель, полученная в неподвижной системе координат более громоздкая и неудобная, для того чтобы произвести настройку и оптимизацию системы векторного управления АД. Поэтому настройку и оптимизацию системы векторного управления АД будем производить с использованием имитационной модели, расположенной во вращающейся системе координат с ориентированной по полю вектора потокосцепления.

### 3.3 ОПТИМИЗАЦИЯ ДВУХКОНТУРНОЙ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Структурная схема линеаризованной САУ

Структурная схема линеаризованной САУ СЭП приведена на рисунке



Рис

унок 19 – Структурная схема САУ СЭП

Она включает в себя три контура:

1. контур тока – внутренний контур;
2. контур скорости – внешний контур;

3. контур потокосцепления – внешний контур;

Контур тока и потокосцепления настраиваем по модульному оптимуму.  
Контур скорости – по симметричному оптимуму.

#### Оптимизация контура составляющих компонентов вектора тока

Контур тока настраиваем по модульному оптимуму. Структурная схема контура приведена на рисунке 20. Контур содержит два инерционных звена первого порядка с постоянными  $T_{инв} = 0.0002$  с и  $T_{\ddot{y}\ddot{o}} = 0.0021$  н. Отношение

$$\frac{T_{\ddot{y}\ddot{o}}}{T_{инв}} = \frac{0.0021}{0.0002} = 10.5 \text{ значительно больше единицы, следовательно, принимаем:}$$

-  $T_{\mu\Gamma} = T_{инв} = 0.0002$  с - малая постоянная времени контура;

-  $T_{\ddot{y}\ddot{o}} = 0.0021$  н - большая постоянная времени контура, которую следует компенсировать.

Структурная схема контура тока приведена на рисунке

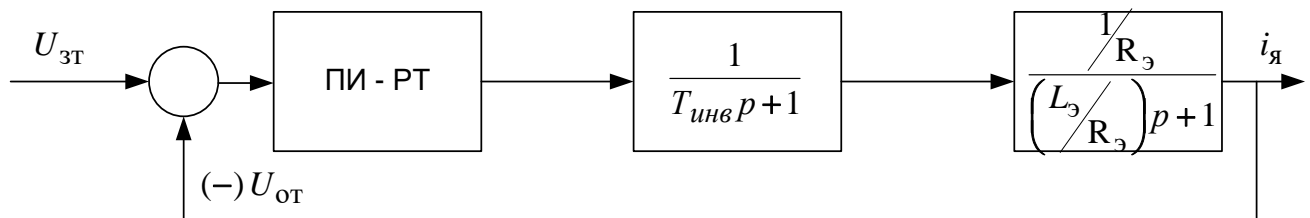


Рисунок 20– Структурная схема контура тока настроенного по МО

Контур тока настраиваем на модульный оптимум (МО). С учетом параметров контура выбираем ПИ – регулятор с передаточной функцией

$$W_{\text{рт}}(p) = k_{\text{рт}} \cdot \frac{T_{\text{рт}} \cdot p + 1}{T_{\text{рт}} \cdot p},$$



где  $T_{\text{рт}} = T_{\text{инв}} = \frac{1}{f_{\text{инв}}} = \frac{1}{5000} = 0.0002 \text{ с}$  - постоянная времени регулятора;

$$k_{\delta\delta} = \frac{R_e}{2} \cdot 10.5 = \frac{52}{2} \cdot 10.5 = 273 - \text{коэффициент усиления регулятора};$$

$$k_T = \frac{U_{\text{зт.макс}}}{I_{\text{эп.макс}}} = \frac{10}{10} = 1 \frac{\text{В}}{\text{А}} - \text{коэффициент обратной связи по току};$$

$a_T = 2$  - коэффициент оптимизации контура тока по МО.

$U_{\text{зт.макс}} = 10 \text{ (В)}$  - максимальное напряжение задания на ток;

### Передаточная функция разомкнутого контура тока

$$\begin{aligned} W_{\text{т.раз}}(p) &= \frac{1}{a_T \cdot T_{\mu\text{т}} \cdot p \cdot (T_{\mu\text{т}} \cdot p + 1)} = \frac{1}{2 \cdot 0.0002 \cdot p \cdot (0.0002 \cdot p + 1)} = \\ &= \frac{1}{8 \cdot 10^{-8} \cdot p^2 + 4 \cdot 10^{-4} \cdot p} \cdot \end{aligned}$$

Передаточная функция замкнутого контура тока

$$\begin{aligned} W_{\text{т.зам}}(p) &= \frac{\frac{1}{k_T}}{a_T \cdot T_{\mu\text{т}} \cdot p \cdot (T_{\mu\text{т}} \cdot p + 1) + 1} = \frac{\frac{1}{1}}{2 \cdot 0.0002 \cdot p \cdot (0.0002 \cdot p + 1)} = \\ &= \frac{1}{8 \cdot 10^{-8} \cdot p^2 + 4 \cdot 10^{-4} \cdot p + 1} \cdot \end{aligned}$$

Ожидаемые показатели работы замкнутого контура тока:

$\sigma = 4.3\%$  - перерегулирование;

$$t_{\text{py1}}^{(5)} = 4.1 \cdot T_{\mu\text{т}} = 4.1 \cdot 0.0002 = 0.00082 \text{ с} - \text{время первого согласования};$$

$$t_{\text{py2}}^{(5)} = 4.1 \cdot T_{\mu\text{т}} = 4.1 \cdot 0.0002 = 0.00082 \text{ с} - \text{время переходного процесса при}$$

отработке ступенчатого управляющего задания;

$$\omega_{\text{п}}^{(\text{м})} = \omega_{\text{п}}^{(\text{ф})} = \frac{0.71}{T_{\mu\text{т}}} = \frac{0.71}{0.0002} = 3550 \frac{\text{рад}}{\text{с}} - \text{полоса пропускания по модулю и}$$

фазе.

По структурной схеме контура тока (см. рисунок 20) набирается имитационная модель, представленная на рисунке .

Имитационная модель контура тока, настроенного по МО, представлена на рисунке 21.

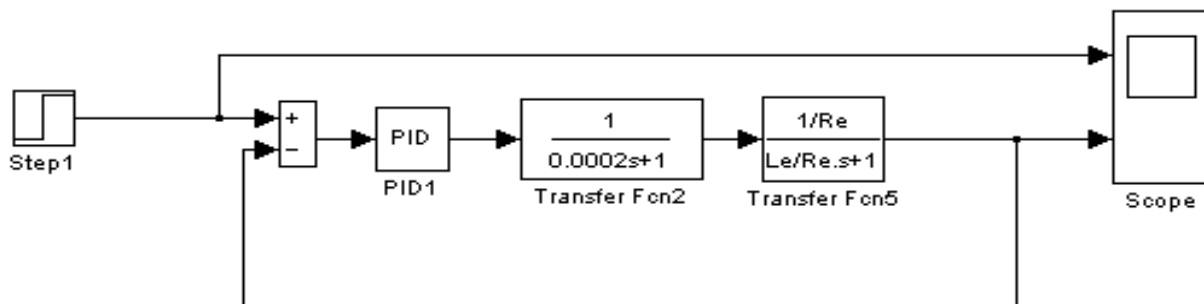


Рисунок 21 - Имитационная модель контура тока, настроенного по МО

Результаты моделирования переходных процессов в контуре тока, настроенного на модульный оптимум при отработке ступенчатого входного воздействия  $U_{зт} = 10 \text{ В}$ , приведены в виде переходной характеристики  $i(t)$  [10] на рисунке 22.

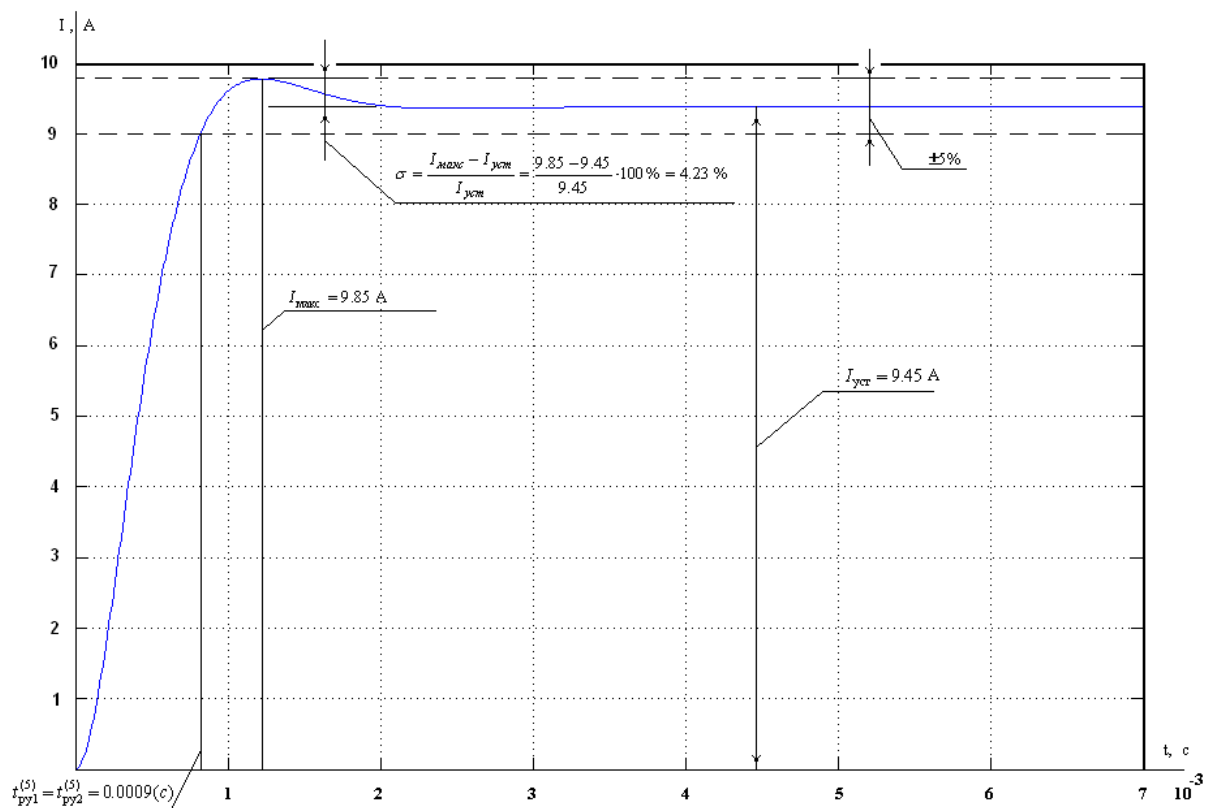


Рисунок 22 - Переходная характеристика  $i(t)$  контура тока

Анализ полученных результатов моделирования показывает, что они наилучшим образом согласуются с ожидаемыми показателями работы контура.

Для наглядности сведем результаты моделирования в таблицу 3

Таблица 3 – Показатели работы контура тока

Показатели	Ожидаемые	Полученные
$\sigma$	4.32	4.23
$t_{py1}^{(5)} = t_{py2}^{(5)}, c$	0.00082	0.0009
$\omega_{\Pi}^{(M)} = \omega_{\Pi}^{(\Phi)}, \frac{рад}{c}$	3550	3670

Выводы:

В контуре тока теоретические и экспериментальные показатели совпадают. Так как установившаяся ошибка  $\Delta I_{уст} = 0$ , то в контуре тока обеспечивается астатическое регулирование. Анализ полученных результатов моделирования показывает, что они наилучшим образом согласуются с ожидаемыми показателями работы контура.

### Оптимизация контура скорости

Структурная схема и параметры элементов контура скорости. Структурная схема контура тока приведена на рисунке 23.

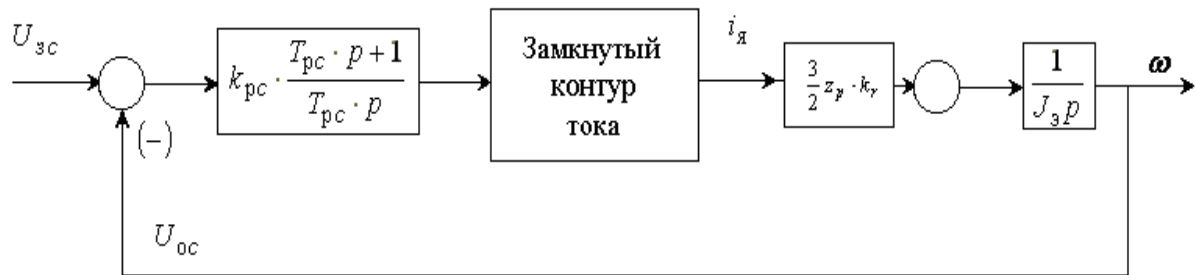


Рисунок 23 – Структурная схема контура скорости настроенного на симметричный оптимум

### Оптимизация контура.

#### Ожидаемые показатели качества работы контура.

Контур скорости настраиваем на симметричный оптимум (СО). С учетом параметров контура выбираем ПИ – регулятор с передаточной функцией

$$W_{pc}(p) = k_{pc} \cdot \frac{T_{pc} \cdot p + 1}{T_{pc} \cdot p},$$

где 
$$k_{\text{дн}} = \frac{J_{\text{y}} 50}{3 \cdot z_p \cdot \psi_r \cdot k_r \cdot 1024 \cdot \dot{O}_{\mu\text{д}}} = \frac{0.05 \cdot 50}{3 \cdot 2 \cdot 0.95 \cdot 0.952 \cdot 1024 \cdot 0.0002} = 2.5 -$$

коэффициент усиления;

$$U_{\text{зс}} = 10 \text{ В};$$

$a_c = 2, b_c = 2$  – коэффициенты оптимизации контура скорости по СО;

$T_{\text{рс}} = 16 \cdot T_{\mu\text{т}} = 16 \cdot 0.0002 = 0.0032 \text{ с}$  – малая постоянная времени контура;

$T_2 = T_{\text{рс}} = 0.0032 \text{ с}$  – постоянная времени контура фильтра в контуре скорости.

Передаточная функция разомкнутого контура скорости, настроенного на СО

$$\begin{aligned} W_{\text{рс.раз}}(p) &= \frac{b_c \cdot a_c \cdot a_r \cdot T_{\mu\text{т}} \cdot p + 1}{b_c \cdot a_c \cdot a_r \cdot T_{\mu\text{т}} \cdot p \cdot \{a_c \cdot a_r \cdot T_{\mu\text{т}} \cdot p [a_r \cdot T_{\mu\text{т}} \cdot p \cdot (T_{\mu\text{т}} \cdot p + 1) + 1]\}} = \\ &= \frac{2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 0.0002 \cdot p + 1}{2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 0.0002 \cdot p \cdot \{2 \cdot 2 \cdot 0.0002 \cdot p [2 \cdot 0.0002 \cdot p \cdot (0.0002 \cdot p + 1) + 1]\}} = \\ &= \frac{0.0016 \cdot p + 1}{1.024 \cdot 10^{-13} \cdot p^4 + 5.12 \cdot 10^{-11} \cdot p^3 + 1.28 \cdot 10^{-6} \cdot p^2}. \end{aligned}$$

Передаточная функция замкнутого контура скорости без фильтра на входе

$$\begin{aligned} W_{\text{дн.зак}}^{\text{áo}}(p) &= \frac{\frac{1}{k_c} \cdot (b_c \cdot a_c \cdot a_{\text{д}} \cdot \dot{O}_{\mu\text{д}} \cdot p + 1)}{b_c \cdot a_c \cdot a_{\text{д}} \cdot \dot{O}_{\mu\text{д}} \cdot p \cdot \{a_c \cdot a_{\text{д}} \cdot \dot{O}_{\mu\text{д}} \cdot p [a_{\text{д}} \cdot \dot{O}_{\mu\text{д}} \cdot p \cdot (\dot{O}_{\mu\text{д}} \cdot p + 1) + 1] + 1\} + 1} = \\ &= \frac{\frac{1}{2.5} \cdot (2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 0.0002 \cdot p + 1)}{2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 0.0002 \cdot p \cdot \{2 \cdot 2 \cdot 0.0002 \cdot p [2 \cdot 0.0002 \cdot p \cdot (0.0002 \cdot p + 1) + 1] + 1\} + 1} = \\ &= \frac{6.35 \cdot 10^{-4} \cdot p + 0.4}{1.024 \cdot 10^{-13} \cdot p^4 + 5.12 \cdot 10^{-11} \cdot p^3 + 1.28 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 + 0.0016 \cdot p + 1}. \end{aligned}$$

Передаточная функция замкнутого контура скорости с фильтром на входе

$$W_{\hat{\sigma}_{\text{н.çà}}}(p) = \frac{1/k_c}{b_c \cdot a_c \cdot a_{\dot{O}} \cdot \dot{O}_{\mu\dot{O}} p \cdot \{a_c \cdot a_{\dot{O}} \cdot \dot{O}_{\mu\dot{O}} \cdot p [a_{\dot{O}} \cdot \dot{O}_{\mu\dot{O}} p \cdot (\dot{O}_{\mu\dot{O}} p + 1) + 1] + 1\} + 1} =$$

$$= \frac{1}{2.5} \cdot \frac{1}{2 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 0.0002 p \cdot \{2 \cdot 2 \cdot 0.0002 p \cdot [2 \cdot 0.0002 \cdot p \cdot (0.0002 \cdot p + 1) + 1] + 1\} + 1}.$$

Передаточная функция фильтра на входе

$$W_{\text{ф.вх}}(p) = \frac{1}{T_2 \cdot p + 1} = \frac{1}{0.0032 \cdot p + 1}$$

Ожидаемые показатели работы замкнутого контура скорости с фильтром на входе:

$\sigma = 6.2\%$  - перерегулирование;

$t_{\text{py1}}^{(5)} = 13.6 \cdot T_{\mu\kappa} = 13.6 \cdot 0.0032 = 0.04352$  с - время первого согласования;

$t_{\text{py2}}^{(5)} = 20.3 \cdot T_{\mu\kappa} = 20.3 \cdot 0.0032 = 0.06496$  с - время переходного процесса при отработке ступенчатого управляющего задания;

$\omega_{\Pi}^{(\text{м})} = \frac{0.284}{T_{\mu\kappa}} = \frac{0.284}{0.0032} = 88.75 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$  - полоса пропускания по модулю;

$\omega_{\Pi}^{(\text{ф})} = \frac{0.18}{T_{\mu\Gamma}} = \frac{0.18}{0.0032} = 56.25 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$  - полоса пропускания по фазе.

По структурной схеме контура скорости, настроенного на СО (см. рисунок 23) набирается имитационная модель в среде MatLab, представленная на рисунке 24.

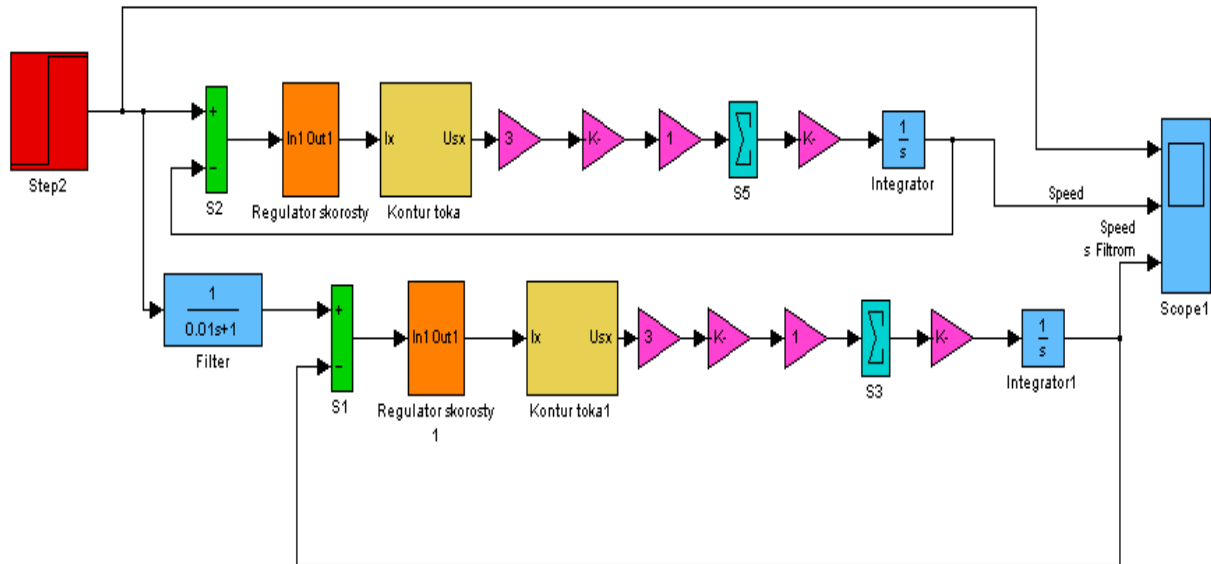


Рисунок 24 – Имитационная модель контура скорости настроенного на СО

### Временные характеристики контура скорости с фильтром на входе.

Результаты моделирования переходных процессов в контуре скорости, настроенного на симметричный оптимум (с фильтром и без фильтра на входе) при обработке ступенчатого входного воздействия  $\omega_{зс.} = 104.7 \text{ рад/с}$ , приведены в виде переходных характеристик  $\omega(t)$  [10] на рисунках 25 и 26.

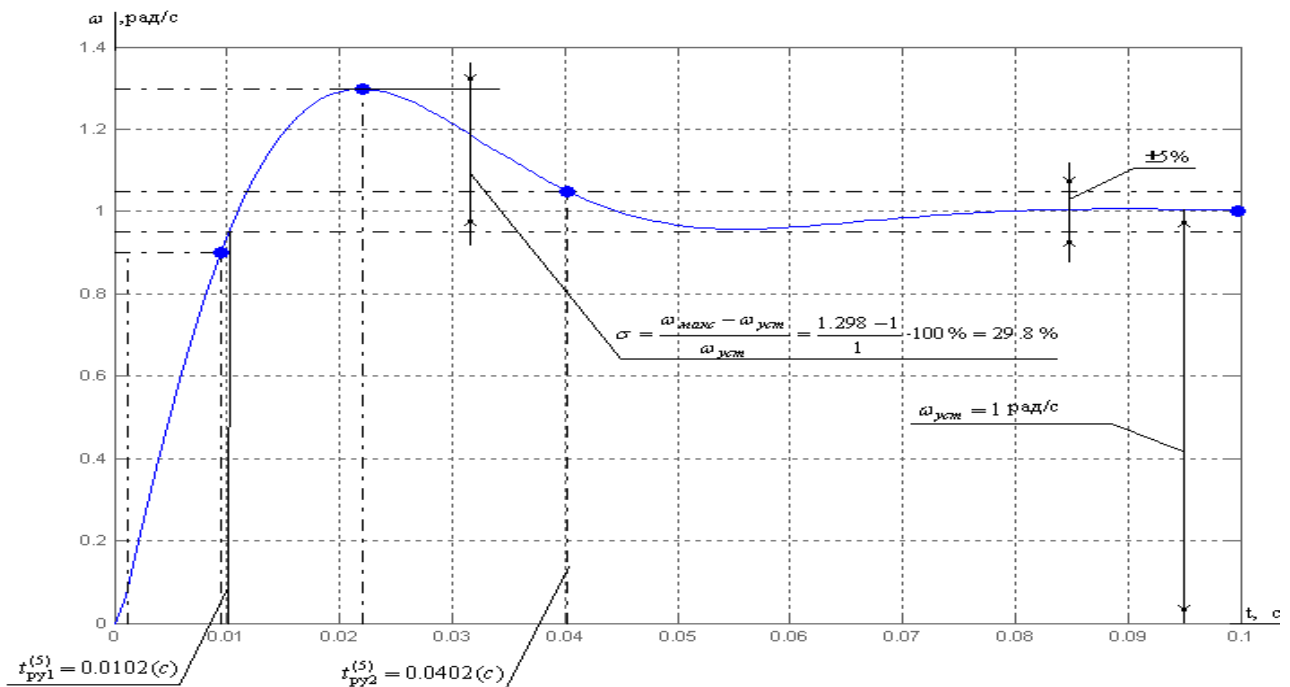
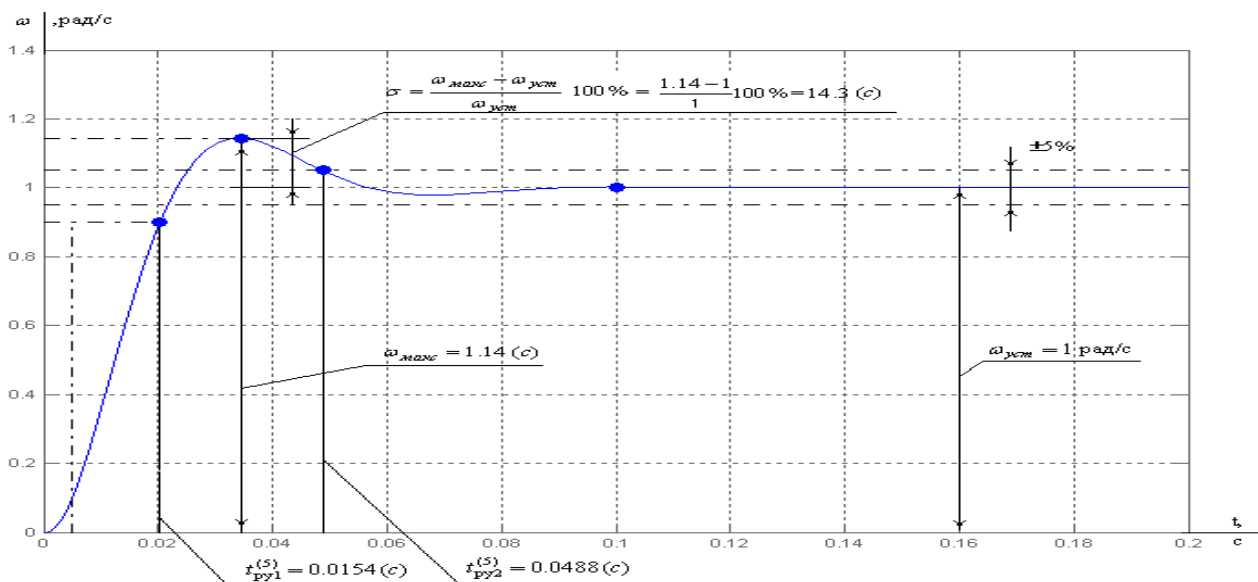


Рисунок 25 – Переходные характеристики  $\omega(t)$  контура скорости настроенного на СО без фильтра на входе



Ри

сунок 26 – Переходные характеристики  $\omega(t)$  контура скорости настроенного на СО с фильтром на входе

### Показатели качества работы контура скорости, настроенного на СО

Ожидаемые и полученные показатели работы контура с фильтром на входе сводим в таблицу 4.

Таблица 4 - Показатели работы замкнутого контура скорости

Показатели	Ожидаемые	Полученные с фильтром	Полученные без фильтра
$\sigma, \%$	6.2	14.3	29.8



$t_{py1}^{(5)}, \text{ с}$	0.0435	0.0154	0.0102
$t_{py2}^{(5)}, \text{ с}$	0.06496	0.0488	0.0402
$\omega_{\Pi}^{(м)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	88.75	136	209
$\omega_{\Pi}^{(ф)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	56.25	107	279

### Выводы:

Анализ экспериментальных и ожидаемых параметров контура скорости, настроенного на симметричный оптимум показывает, что они практически не отличаются друг от друга. Небольшая разница экспериментальных и ожидаемых параметров связана с неточностью обработки графиков. Установившаяся ошибка при настройке контура скорости по СО  $\Delta\omega_{y.уст}=0$ , следовательно этот контур обладает астатизмом первого порядка по управлению. Качество переходных процессов в контуре скорости с фильтром на входе лучше, чем без него (малое перерегулирование), поэтому для дальнейших расчетов будем рассматривать случай с фильтром.

## Оптимизация контура потокосцепления

Структурная схема и параметры элементов контура потокосцепления.

Структурная схема контура тока приведена на рисунке 27.

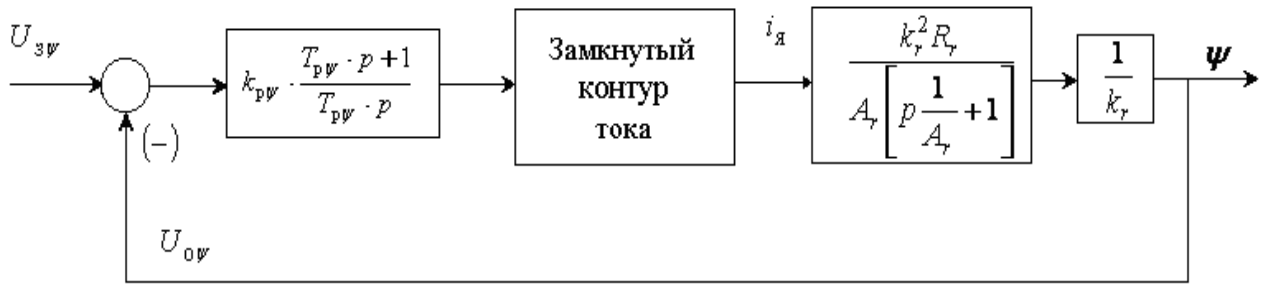


Рисунок 27 – Структурная схема контура потокосцепления настроенного на модульный оптимум

### Оптимизация контура.

#### Ожидаемые показатели качества работы контура.

Контур потокосцепления настраиваем на модульный оптимум (МО). С учетом параметров контура выбираем ПИ – регулятор с передаточной функцией

$$W_{p\psi}(p) = k_{p\psi} \cdot \frac{T_{p\psi} \cdot p + 1}{T_{p\psi} \cdot p},$$

где  $k_{p\psi} = 29.865$  – коэффициент усиления потокосцепления;

Ожидаемые показатели работы замкнутого контура потокосцепления:

$\sigma = 8.1\%$  - перерегулирование;

$$t_{py1}^{(5)} = 7 \cdot T_{\mu\psi} = 7 \cdot 0.0004 = 0.0014 \text{ с - время первого согласования;}$$

$$t_{py2}^{(5)} = 12 \cdot T_{\mu\psi} = 12 \cdot 0.0004 = 0.0028 \text{ с - время переходного процесса при}$$

отработке ступенчатого управляющего задания;

$$\omega_{\Pi}^{(M)} = \frac{0.5}{T_{\mu\psi}} = \frac{0.5}{0.0002} = 2500 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \text{ - полоса пропускания по модулю;}$$

$$\omega_{\Pi}^{(\Phi)} = \frac{0.35}{T_{\mu\psi}} = \frac{0.35}{0.0002} = 1750 \frac{\text{рад}}{\text{с}} \text{ - полоса пропускания по фазе.}$$

## Имитационная модель контура

По структурной схеме контура потокосцепления, настроенного на МО набирается имитационная модель в среде MatLab, представленная на рисунке 28:

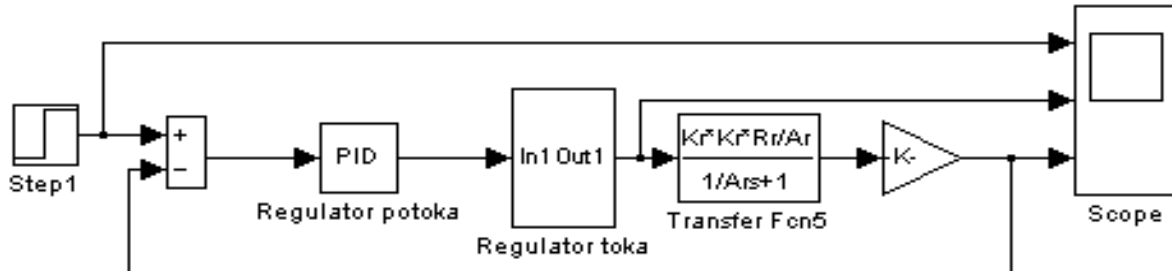
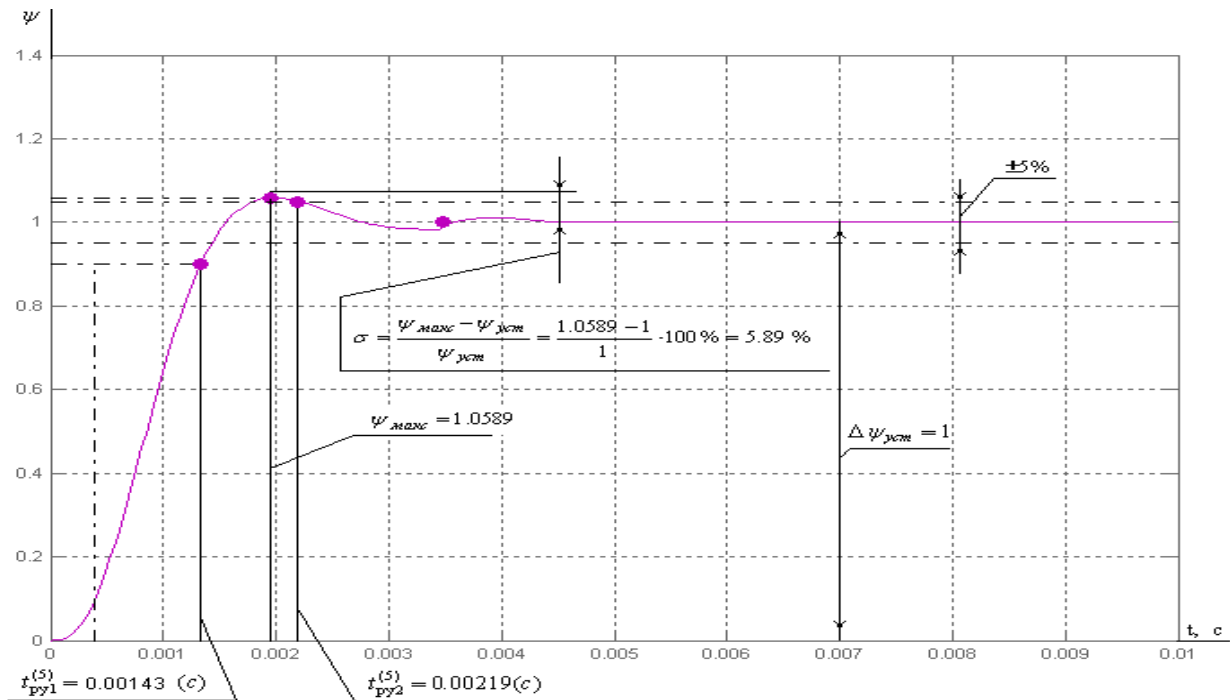


Рисунок 28 – Имитационная модель контура потокосцепления, настроенного на МО

## Временные характеристики контура потокосцепления.

Результаты моделирования переходных процессов в контуре потокосцепления, настроенного на модульный оптимум при отработке ступенчатого входного воздействия  $\psi_{зс.} = 1$ , приведены в виде переходной характеристики [10] на рисунке 29.



**Рисунок 29 – Переходные характеристики контура потокосцепления  
настроенного на МО**

**Показатели качества работы контура потокосцепления, настроенного на  
МО**

Ожидаемые и полученные показатели работы контура потокосцепления сводим в таблицу 5:

**Таблица 5 - Показатели работы замкнутого контура потокосцепления**

Показатели	Ожидаемые	Полученные
$\sigma, \%$	8.1	5.89
$t_{py1}^{(5)}, \text{с}$	0.0014	0.00143
$t_{py2}^{(5)}, \text{с}$	0.0028	0.00219
$\omega_{\Pi}^{(м)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	2500	1250
$\omega_{\Pi}^{(ф)}, \frac{\text{рад}}{\text{с}}$	1750	1790

**Выводы:**

Анализ экспериментальных и ожидаемых параметров контура потокосцепления, настроенного на модульный оптимум показывает, что они практически не отличаются друг от друга. Небольшая разница экспериментальных и ожидаемых параметров связана с неточностью обработки графиков. Установившаяся ошибка при настройке контура потокосцепления по МО  $\Delta\psi_{y,уст}=0$ , следовательно этот контур обладает астатизмом первого порядка по управлению.

### 3.4 ИССЛЕДОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОЙ САУ

#### Анализ основных нелинейностей САУ

Учтем следующие основные нелинейности характеристик элементов САУ:

- насыщение регулятора потокосцепления  $U_{\delta i} \leq 10.04 \text{ A}$ , принимаем  $U_{\text{рп макс}} = 10.04 \text{ B}$ ;

- насыщение регулятора скорости  $U_{\text{рс макс}} \leq (10 \div 12) \text{ B}$ . Принимаем  $U_{\text{рс макс}} = 10.04 \text{ B}$ ;

- насыщение регулятора тока (на выходе регулятора)  $U_{\text{рт макс}} \leq (10 \div 12) \text{ B}$ . Принимаем  $U_{\text{рт макс}} = 10 \text{ B}$ ;

- ограничение напряжения на входе асинхронной машины не превышает  $311 \text{ B}$

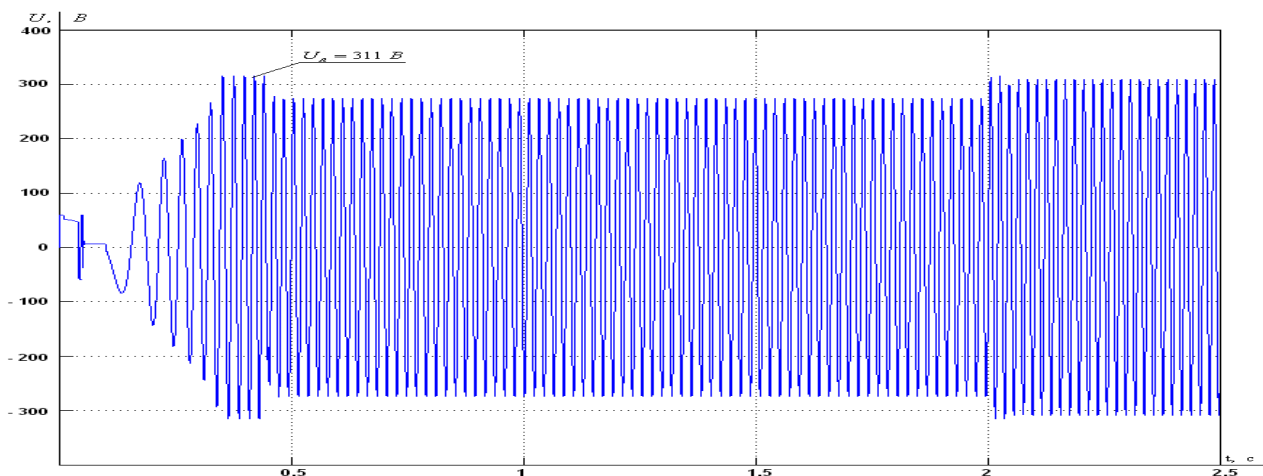
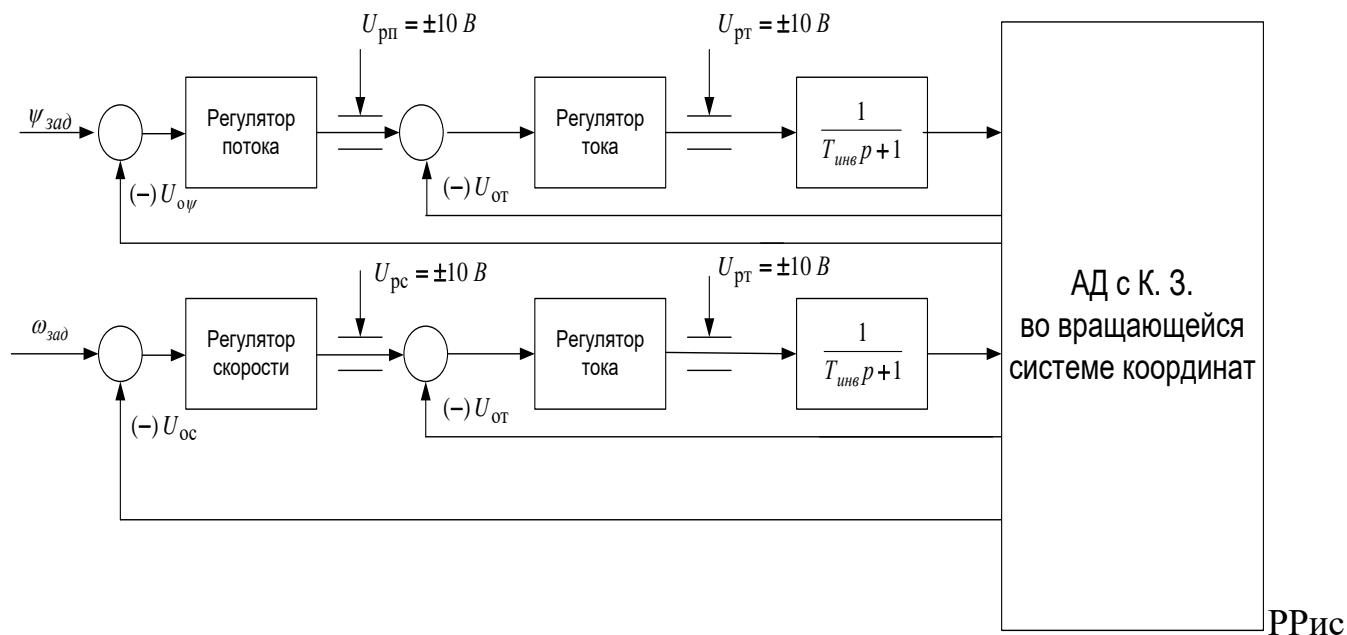


Рисунок 30 – Ограничение напряжения (линейного) сети на уровне

$$U_{\text{л}} = 311 \text{ B}$$

Структурная схема нелинейной САУ

Структурная схема нелинейной САУ СЭП представлена на рисунке 31.



унок 31 - Структурная схема нелинейной САУ СЭП

## Исследование динамики электропривода в различных режимах

### Пуск на холостом ходу и наброс нагрузки

Исследования динамики электропривода проводились с привязкой к рабочему механизму. Пуск двигателя производился на холостом ходу:  $M_c = 0$  ( $t = 0(c)$ ), затем осуществляется наброс нагрузки:  $\dot{I}_{\bar{n}} = 1.7(\dot{I} \cdot \dot{i})$  ( $t = 2(c)$ )

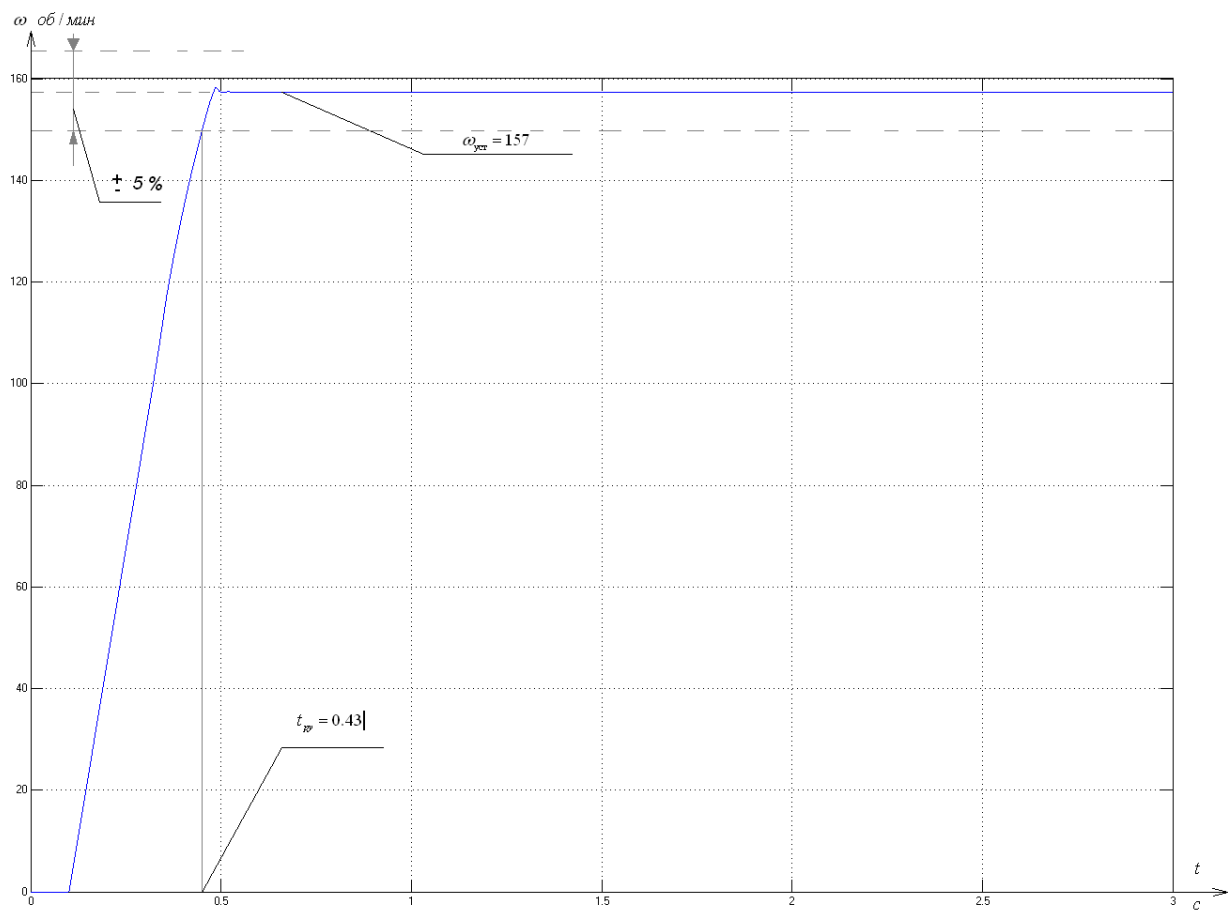


Рисунок 32 - Переходный процесс скорости при пуске на холостом ходу и последующем набросе нагрузки (при скорости 157 рад/с)

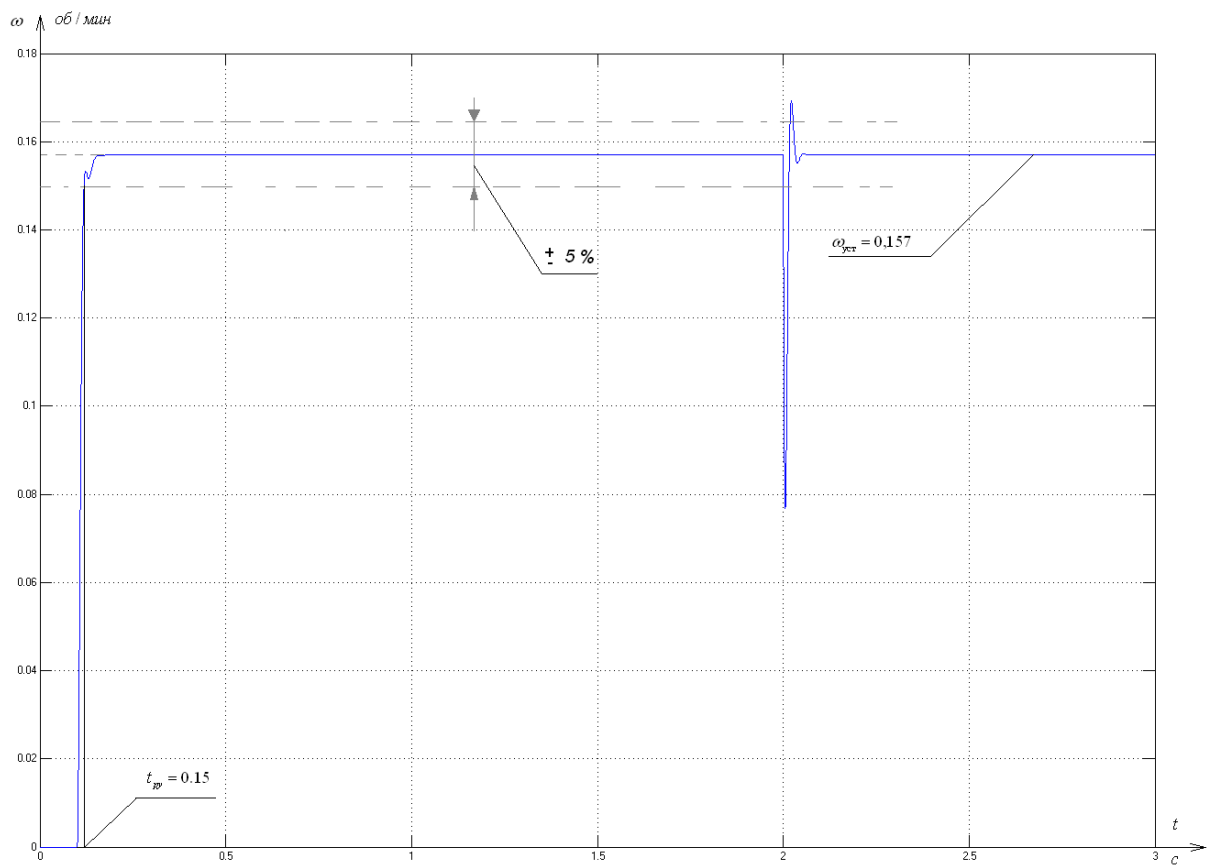


Рисунок 33 - Переходный процесс скорости при пуске на холостом ходу и последующем набросе нагрузки (при скорости 0,157)

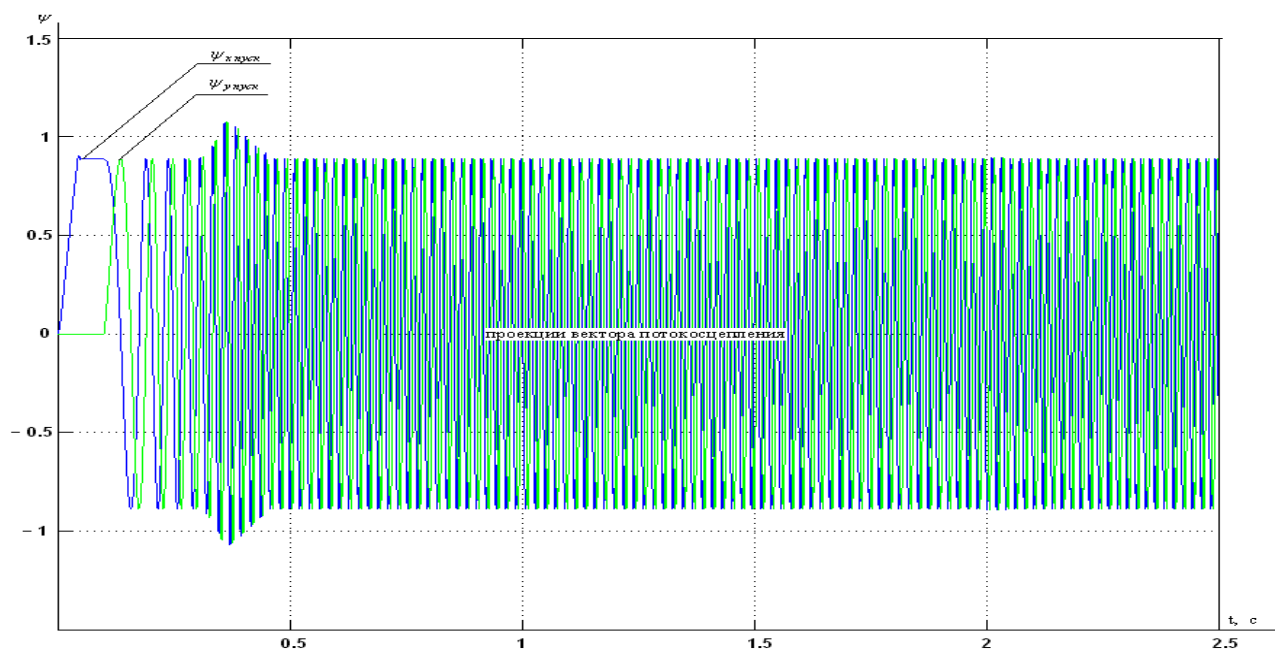




Рисунок 34 - Динамические характеристики потока двигателя (при скорости 157 рад/с)

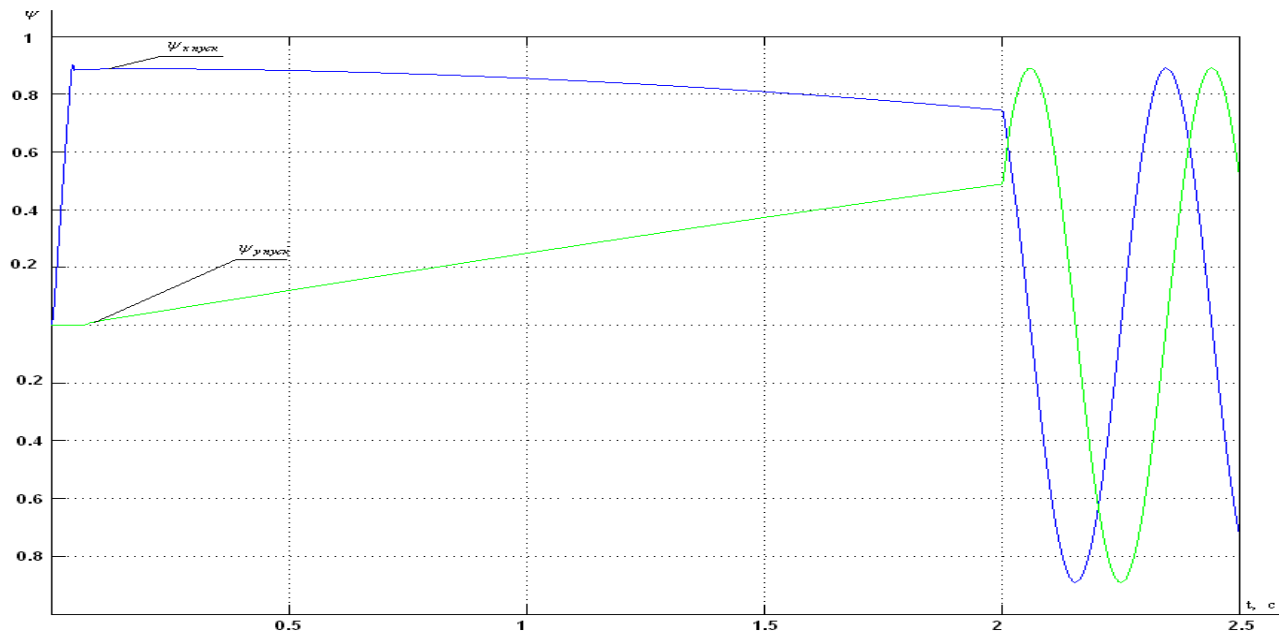


Рисунок 35 - Динамические характеристики потока двигателя (при скорости 0,157 рад/с)

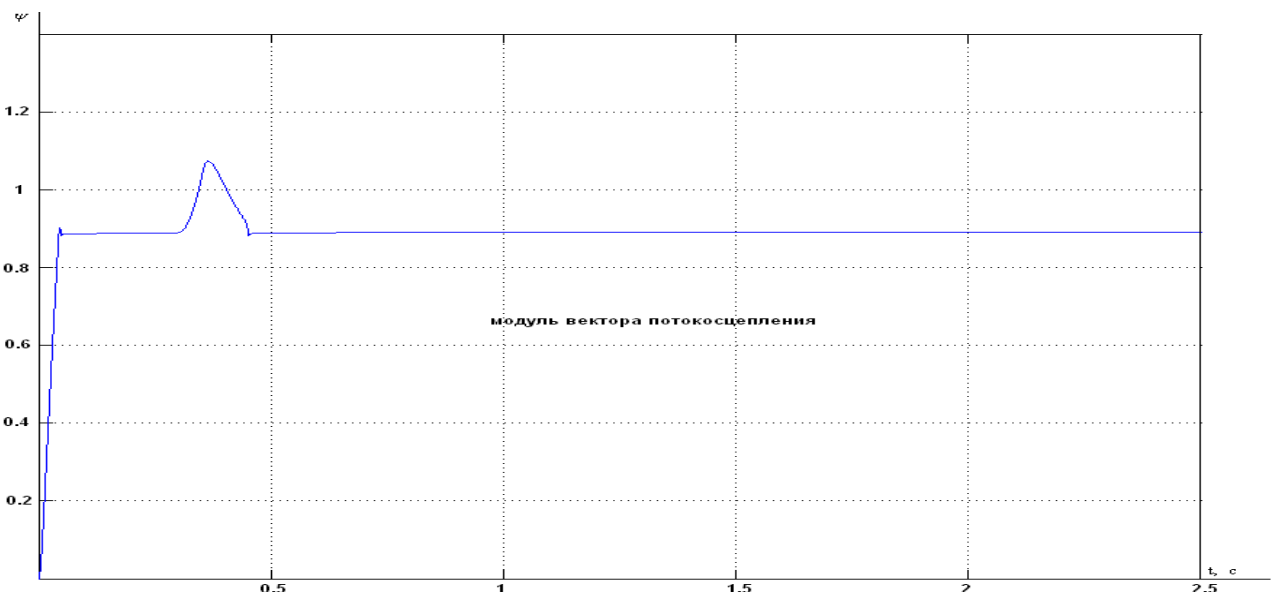


Рисунок 36 - Динамическая характеристика модуля вектора потокоцепления (при скорости 157 рад/с)

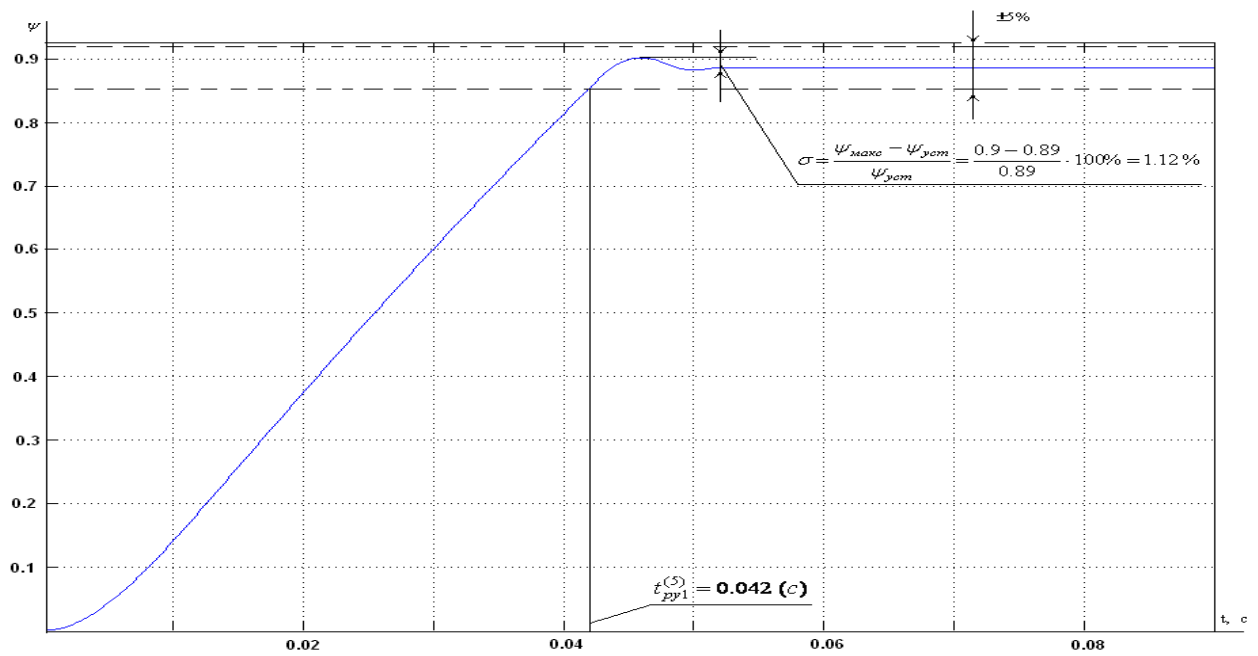


Рисунок 37 - Динамическая характеристика модуля вектора  
потокосцепления (при скорости 0,157 рад/с)

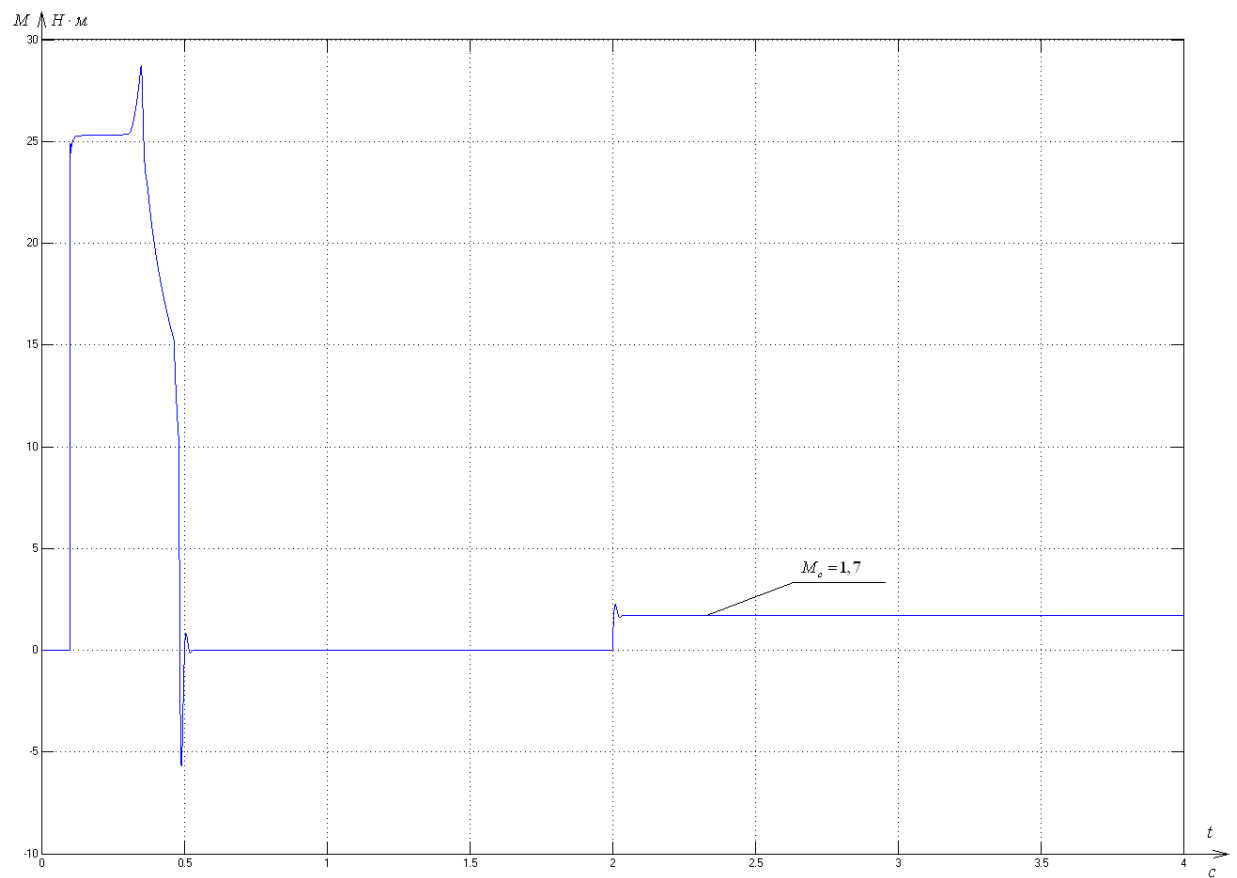


Рисунок 38 - Переходный процесс момента при пуске на холостом ходу и последующем набросе нагрузки (при скорости 157 рад/с)

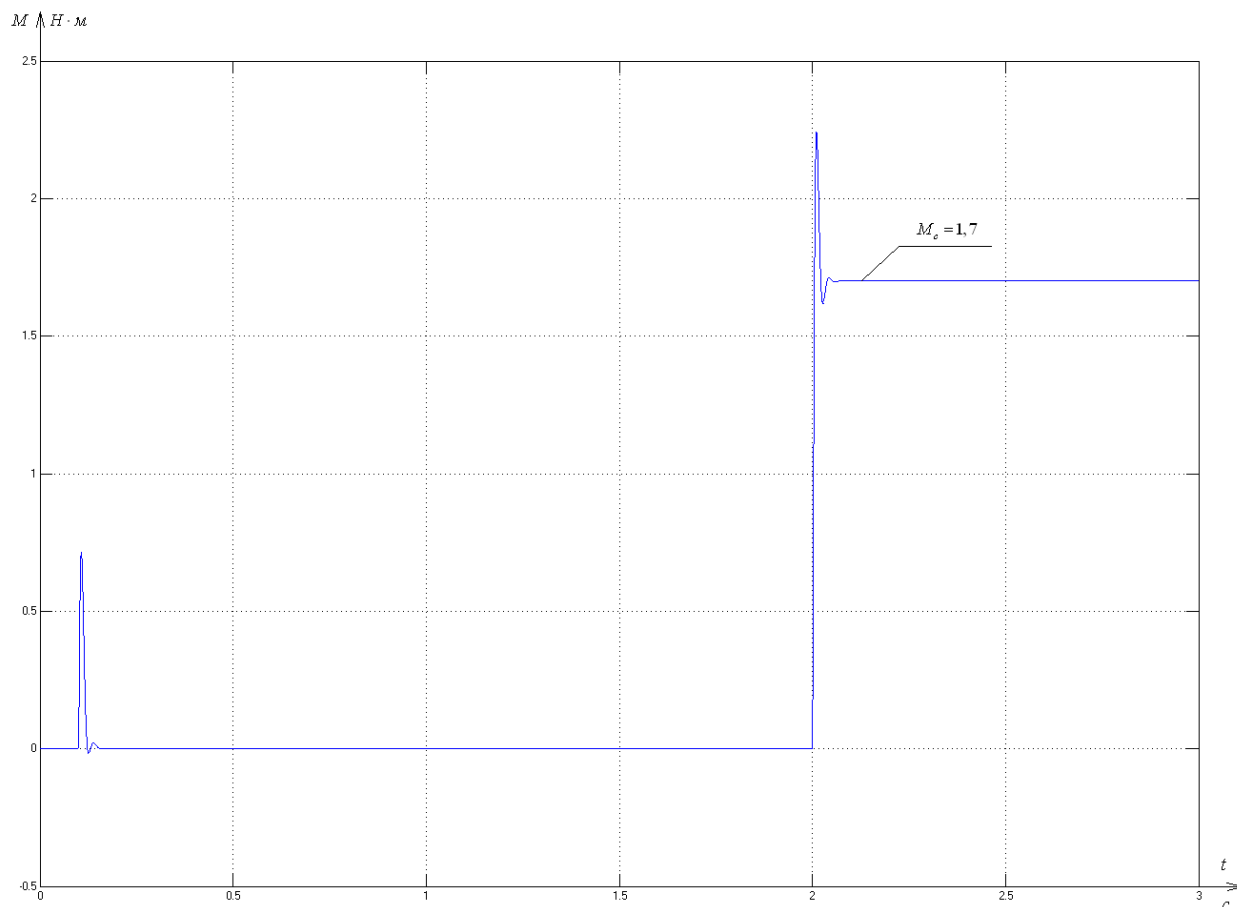


Рисунок 39 - Переходный процесс момента при пуске на холостом ходу и последующем набросе нагрузки (при скорости 0,157 рад/с)

Проанализировав рисунки, можно сделать вывод о том, что в процессе пуска двигателя ток не превышает заданного значения, то есть токовые перегрузки не выходят за рамки предельных значений (двукратное значение номинального тока двигателя).

По рисункам можно проследить динамику разгона асинхронного двигателя:

- ❖ Происходит увеличение потока двигателя;
- ❖ За контуром потока срабатывает контур тока: происходит увеличение тока двигателя;

- ❖ Увеличение тока приводит к возникновению электромагнитного момента, затем и механического на валу двигателя;
- ❖ В результате возникновения момента на валу происходит увеличение скорости асинхронного двигателя.

Рассмотрим систему при повороте заслонки на несколько градусов, т.е. будем задавать разные значения момента.

Задание момента изначально было 5 Нм, затем для того что бы задвижка изменила свое положение задаем через определенное время значение 3,4 Нм, что можно видеть на рисунке 40.

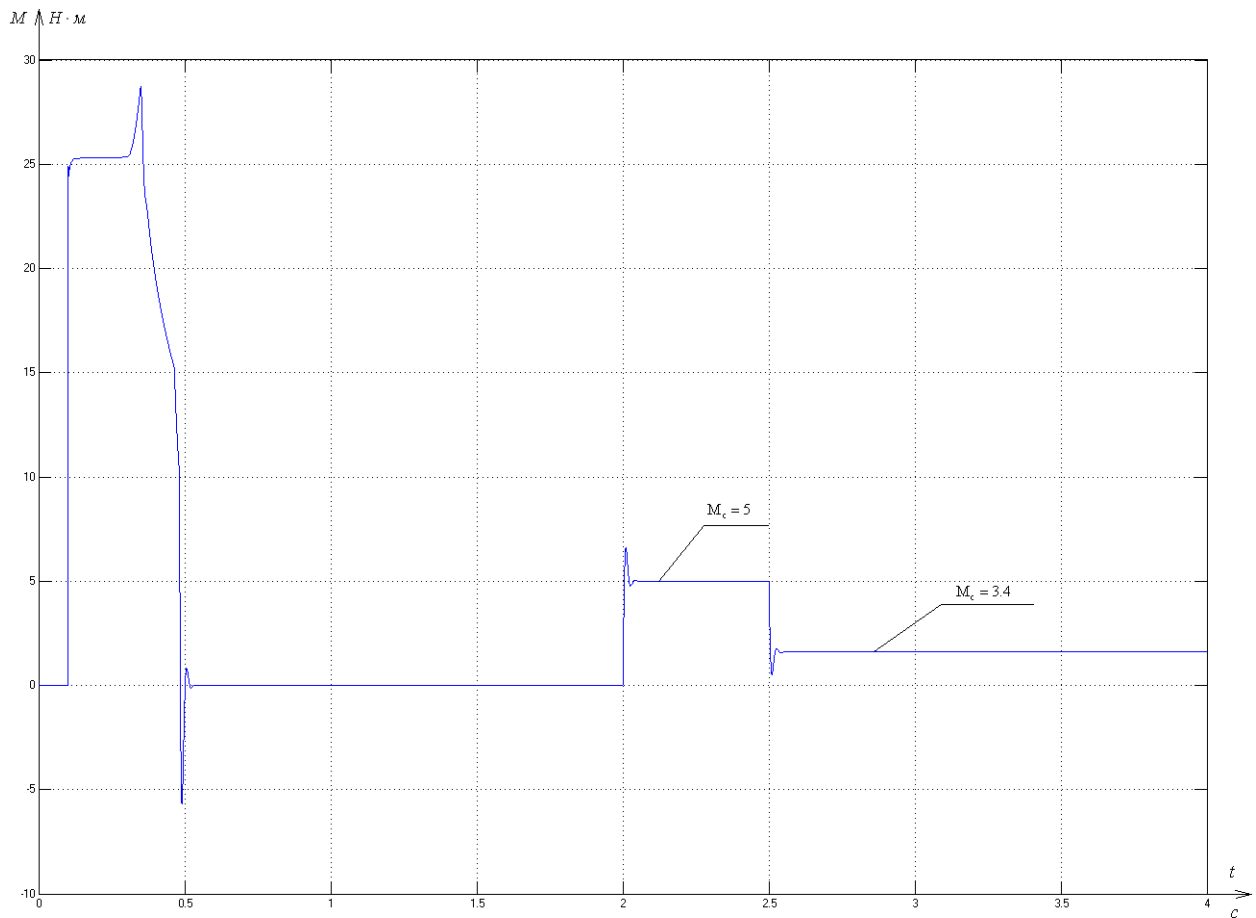


Рисунок 40 – переходные процессы при пуске на холостом ходу и последующим набросе нагрузки 5 Нм, затем уменьшаем нагрузку до 3,4 Нм (при скорости 157 рад/с)

#### **4. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ НА РАБОТУ ЭЛЕКТРОПРИВОДА С МОДУЛЕМ УПРАВЛЕНИЯ ESD-VCX**

Для того что бы исследовать влияние напряжения на наш блок воспользуемся программкой аналогичного блока. Программный продукт SimBlock 1.1 является программным имитатором блока электронного управления ESD-VC, предназначенного для эксплуатации в составе электроприводов запорной арматуры. Имитатор реализован на базе математического описания электропривода и блока, а также программного обеспечения блока, и позволяет моделировать процессы, возникающие при эксплуатации блока.

##### **Схема подключения блока по "дискретному интерфейсу"**

Окно со схемой подключения блока по "дискретному интерфейсу" открывается при выборе в палитре компонентов программы соответствующего компонента или одновременно с выбором типа блока.

В окне на рисунке 41 изображена схема подключения блока с управлением по "дискретному интерфейсу" для блока ESD-VC.

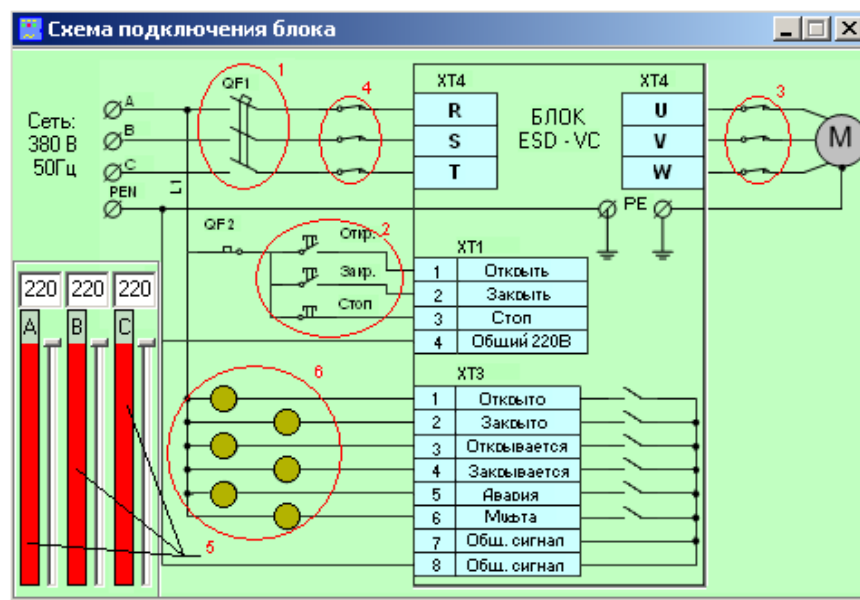


Рисунок 41 - Схема подключения блока

- 1 - автомат QF1, 2 - кнопки управления блока,  
3 - размыкатели фаз электродвигателя, 4 - размыкатели фаз питания блока,  
5 - регуляторы напряжения каждой из фаз "сети", 6 - телесигнализация*

Автомат QF1 1 подаёт питание на блок. С помощью кнопок управления 2 производится подача на блок команд управления электродвигателем. Телесигнализация 6 показывает состояние и режимы работы блока.

Перед тем как начать исследования, настраиваем блок по определенному алгоритму. Настраиваем положение закрытого состояния, а также открытого.

Запускаем систему, при этом замыкая QF1, затем даем команду на движение (открыть/закреть).

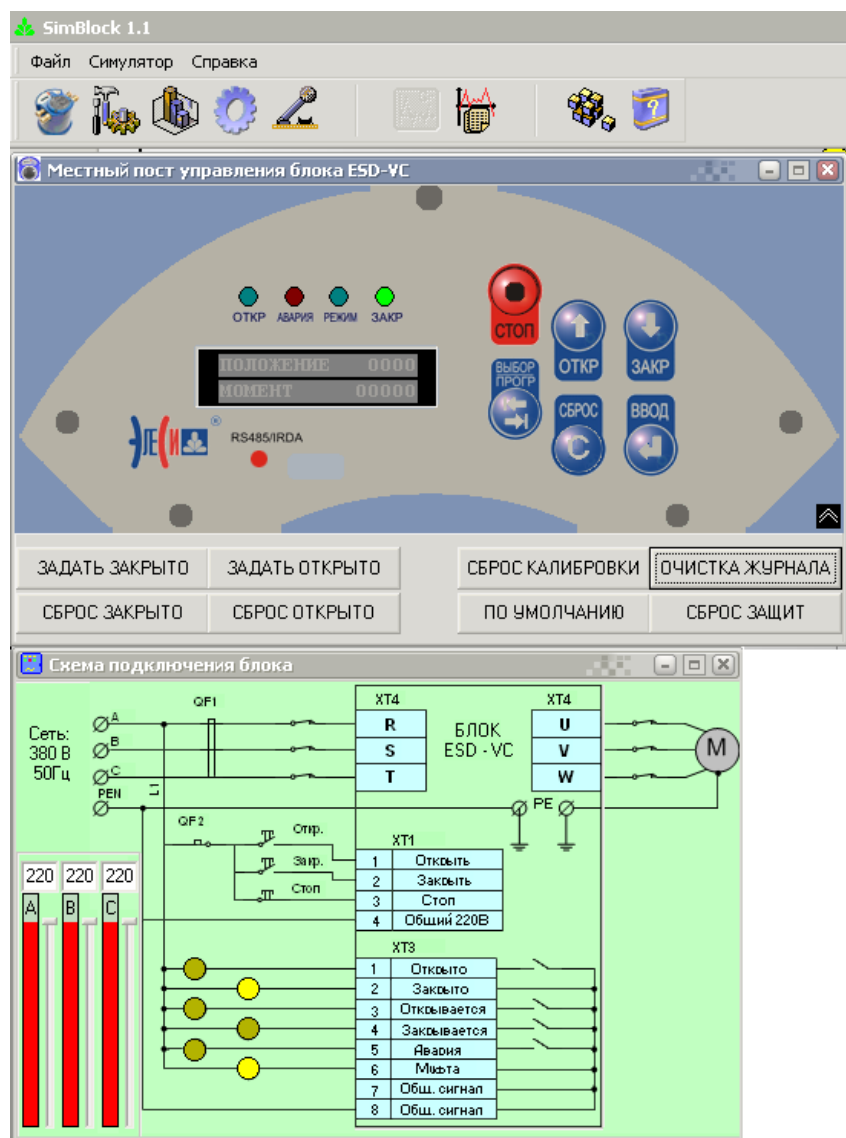


Рисунок 42 – интерфейс управления симмулятора

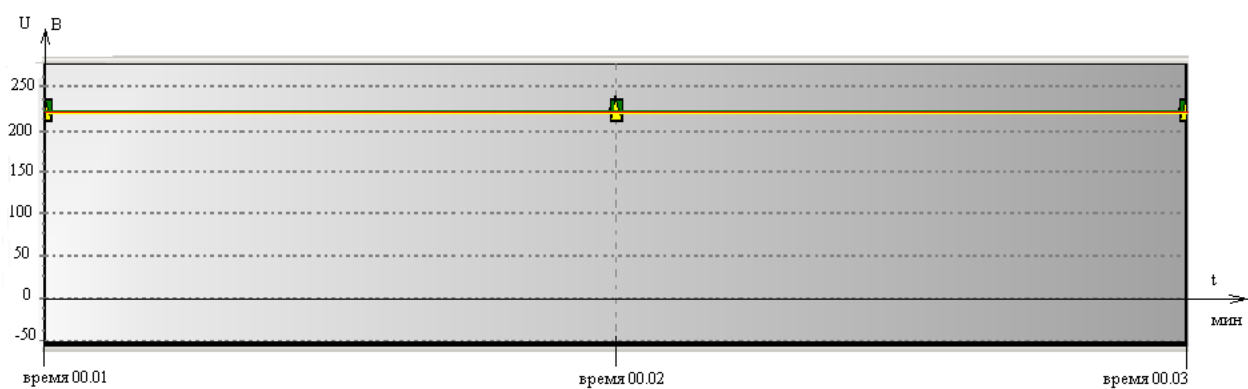


Рисунок 43 – Напряжение фаз на блоке при команде ЗАКРЫТИЕ

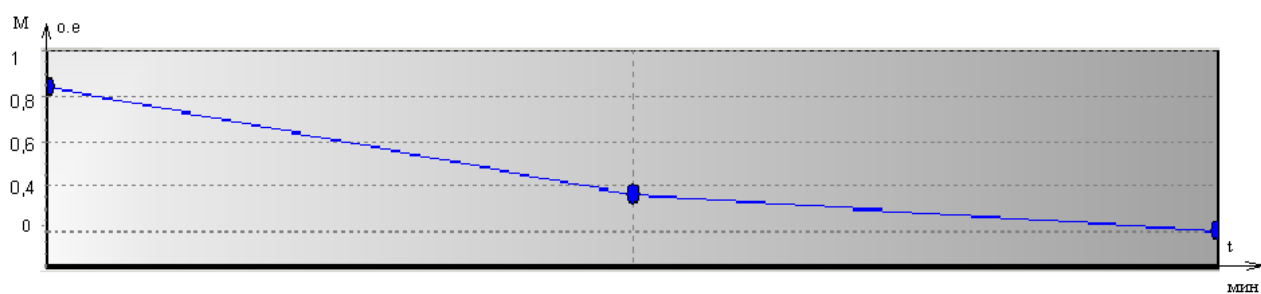


Рисунок 44 – Момент на валу двигателя при закрытии

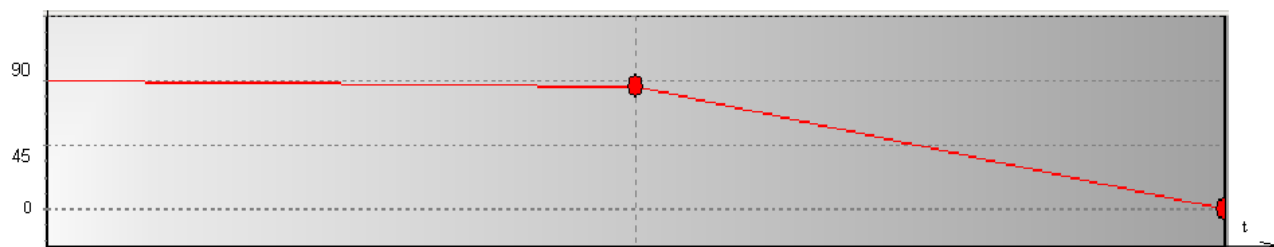


Рисунок 45 – положение задвижки при закрытии



Как видно из графиков, система блок управления не дает моменту перерегулирование, соответственно изменяется почти линейно. Это влияние хорошо сказывается на кавитационном запасе в трубе.

#### 4.1 РАБОТА СИСТЕМЫ ПРИ СНИЖЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ НА ОДНОЙ ИЗ ФАЗ СРАЗУ ПОСЛЕ СТАРТА ДВИГАТЕЛЯ.

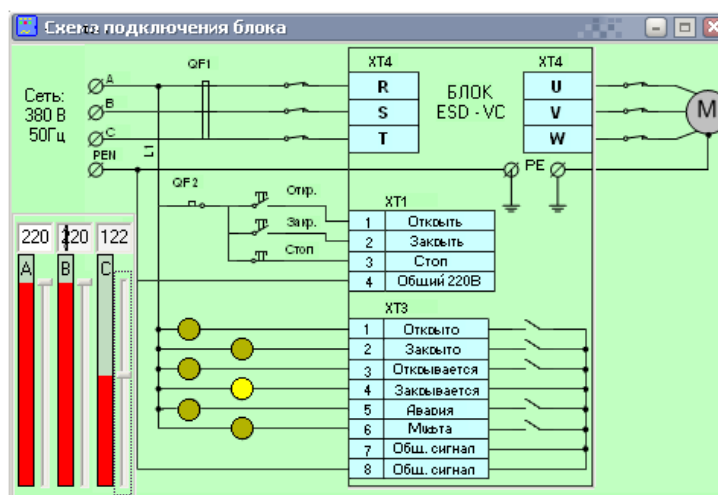


Рисунок 46 – интерфейс схемы при снижении напряжения на фазе С до 122 В



Рисунок 47 – Напряжение на фазах

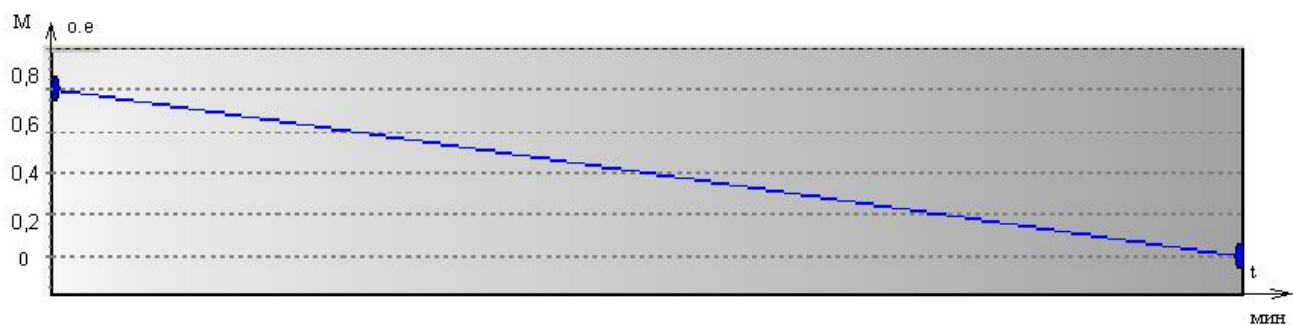


Рисунок 48 – Момент на валу двигателя

#### 4.2 РАБОТА СИСТЕМЫ, КОГДА НАПРЯЖЕНИЕ В СЕТИ ПОНИЖЕННОЕ НА ВСЕХ ФАЗАХ.

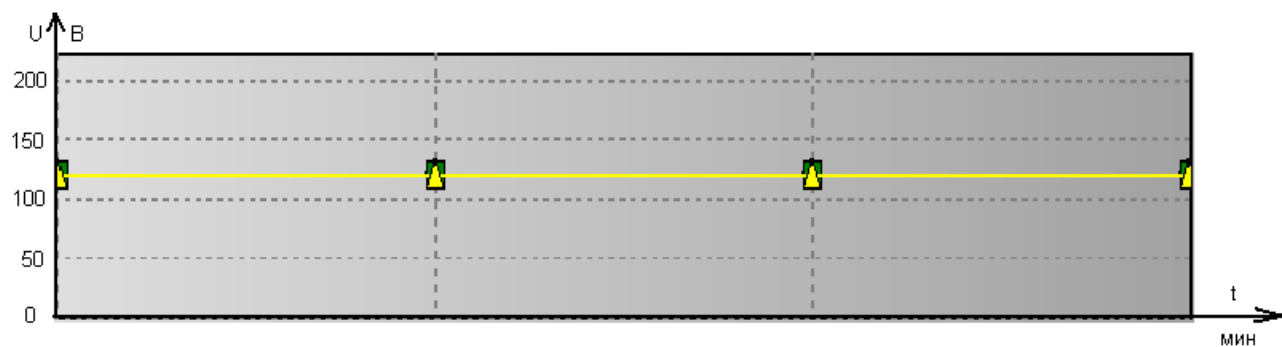


Рисунок 49 – Напряжение на фазах

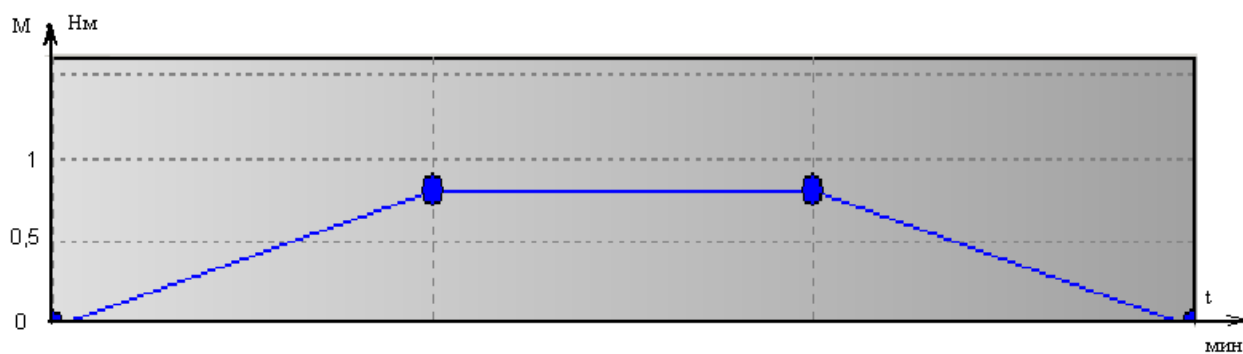


Рисунок 50 – Момент на валу двигателя

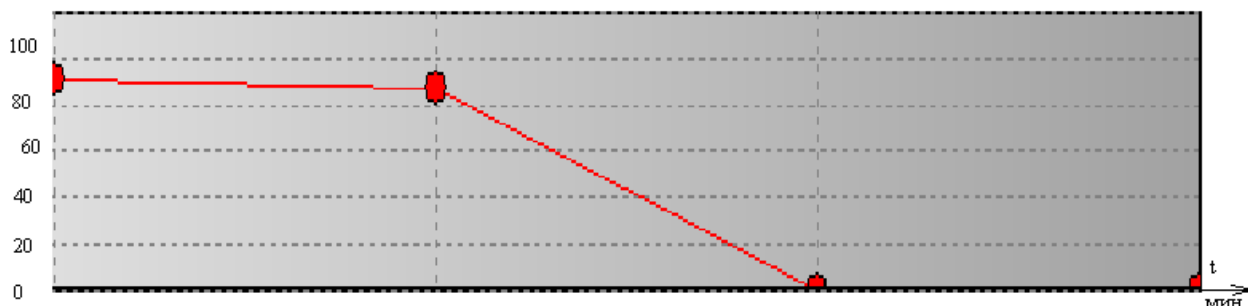


Рисунок 51 – положение заслонки

## 5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

В данной выпускной квалификационной работе произведено проектирование электропривода заслонки неполноповоротного для трубопровода с учётом соответствующего технического задания. Рассчитана система управления установки, параметры двигателя. Созданы модели функциональных блоков, с которых были сняты характеристики переходных процессов, определяющих качество проектирования.

### Организационная часть

При планировании деятельности нормативным методом рассчитываются с использованием имеющихся нормативов трудоемкость работ по всем стадиям и этапам, длительность отдельных этапов и всего проекта в целом, смета затрат.

Под трудоёмкостью работ понимают максимально-допустимые затраты труда в человеко-днях на выполнение НИР с учётом организационно-

технических мероприятий, обеспечивающих наиболее рациональное использование выделенных ресурсов.

На основе установленной по нормативам трудоемкости работ может быть рассчитан цикл каждой стадии, каждого этапа технической подготовки производства в календарных днях.

Расчет обычно ведется по формуле [16]:

$$t = \frac{3 \cdot t_{\min} + 2 \cdot t_{\max}}{5}, \quad (1)$$

где  $t_{\min}$  – минимальный срок выполнения проектирования;

$t_{\max}$  – максимальный срок выполнения проектирования при самых неблагоприятных условиях.

$t_{\min}$  и  $t_{\max}$  установлены экспертным путем.

Организация работ по технической подготовке производства основывается на последовательном или параллельно-последовательном выполнении стадий и этапов.

Последовательное выполнение заключается в том, что каждая следующая стадия (этап) начинаются только после полного завершения предшествующей. В этом случае общий цикл технической подготовки производства в календарных днях будет определяться по формуле:

$$T_{\text{пол}} = (k_3 / q) \sum_{i=1}^n (\tau \cdot k_2 / R \cdot k_1)_i, \quad (2)$$

где  $n$  – число стадий (этапов) технической подготовки производства;

$\tau_i$  – трудоемкость стадии (этапа), чел/ч;

$k_{2i}$  – коэффициент, учитывающий дополнительное время на согласование, утверждение, внесение изменений в техническую документацию и другие работы, не предусмотренные нормативами ( $k_2=1,1 \div 1,5$ );

$k_3$  – коэффициент перевода рабочих дней в календарные:  $k_3 = D_k / D_p$  ( $D_p$  – число рабочих дней в плановом году;  $D_k$  – число календарных дней в плановом году);

$R_i$  – численность работников, одновременно выполняющих данную стадию (этап);

$q$  – продолжительность смены, ч;

$k_{1i}$  – коэффициент, учитывающий выполнение норм (при сдельной оплате труда).

Он должен быть сопоставлен с директивным сроком  $T_{\text{дир}}$ , установленным руководящими органами. Расчетный цикл должен быть меньше директивного или, в крайнем случае, равен ему. Цикл технической подготовки производства можно сократить либо путем сокращения цикла выполнения отдельных стадий, либо частичным совмещением выполнения стадий (этапов). При этом соблюдаются следующие правила:

- если последующая стадия (этап) более длительная, ее можно начинать почти одновременно с предыдущей;

- если последующая стадия менее длительная, то ее начало надо сдвинуть вправо по шкале времени по отношению к началу связанной с ней предшествующей стадии.

Для координации во времени стадий и этапов подготовки производства составляются с учетом возможного совмещения времени их выполнения графики подготовки производства, позволяющие отразить календарные сроки начала и окончания, циклы стадий и этапов, а также всей подготовки производства. График составляется от конечного, заданного срока окончания подготовки.

На основе установленной трудоемкости работ может быть рассчитан цикл каждой стадии, каждого этапа процесса в календарных днях

(выражение 1). Организация работ основана на последовательном и параллельно-последовательном выполнении стадий и этапов.

Таблица 5.1 - Основные этапы проектирования

Этапы	Исполнители	Сроки выполнения, дни
1.Разработка и утверждение технического задания	Руководитель	1
2. Определение последовательности этапов	Студент Руководитель	2
3. Анализ и выбор основных элементов электродвигателя	Студент	12
4. Разработка функциональных схем	Студент	5
5. Разработка структурной схемы	Студент	1
6. Расчет параметров силовой цепи	Студент	1
7. Расчет двигателя	Студент	2
8. Расчет электрической части электропривода	Студент	20
9. Разработка модели функционирования системы	Студент Руководитель	5
10. Утверждение результатов: расчеты, графики	Студент	7
11.Расчет экономической части	Студент	17
12.Определение раздела техники безопасности	Студент	12
13.Доработка документации (пояснительной записки)	Студент Руководитель	10
14. Утверждение дипломного проекта	Студент Руководитель	8
15.Защита	Студент	1

В таблице 5.1 определены основные этапы выполнения дипломного проекта, перечислены лица, задействованные в процессе выполнения диплома, а также указано предполагаемое время, затраченное на работу.

Ожидаемое время работы  $T_{ож} = 104$  дня.

Результаты планирования показали, что время, затраченное на написание диплома для: студента - 103 дня; руководителя - 26 дней.

По таблице 5.1 строим график, представленный на рисунке 5.1.

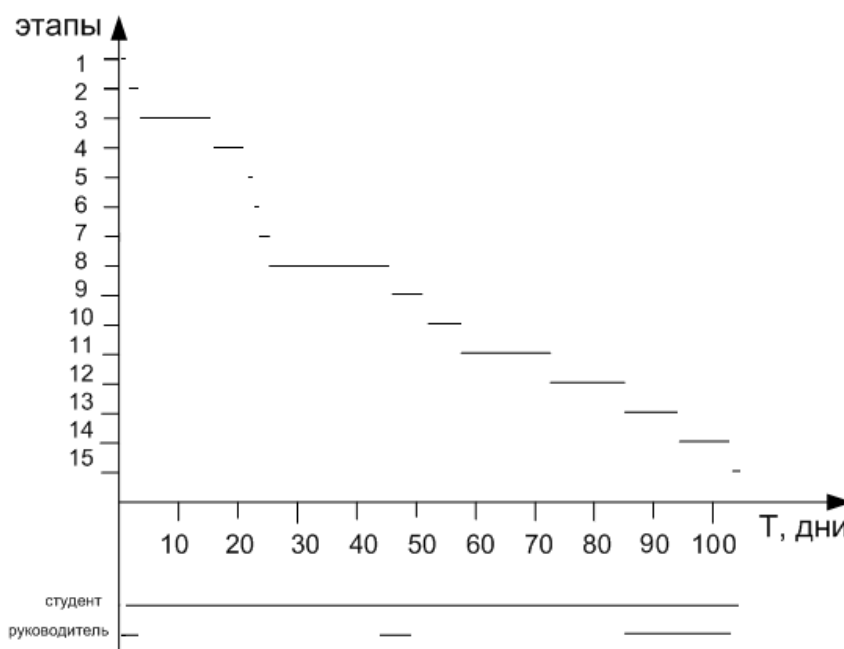


Рисунок 5.1 – Линейный график выполнения работ.

## Технология QUAD

Технология QuaD (QUality ADvisor) представляет собой гибкий инструмент измерения характеристик, описывающих качество новой разработки и ее перспективность на рынке и позволяющие принимать решение целесообразности вложения денежных средств в научно-исследовательский проект.

В основе технологии QuaD лежит нахождение средневзвешенной величины следующих групп показателей:

Показатели оценки коммерческого потенциала разработки:

- влияние нового продукта на результаты деятельности компании;
- перспективность рынка;
- пригодность для продажи;
- перспективы конструирования и производства;
- финансовая эффективность.
- правовая защищенность и др.

Показатели оценки качества разработки:

- динамический диапазон;
- вес;
- ремонтпригодность;
- энергоэффективность;
- долговечность;
- эргономичность;
- унифицированность;

Показатели оценки качества и перспективности новой разработки подбираются исходя из выбранного объекта исследования с учетом его технических и экономических особенностей разработки, создания и коммерциализации.

Для упрощения процедуры проведения QuaD оценка проводится в табличной форме (таблица 5.2).

В соответствии с технологией QuaD каждый показатель оценивается экспертным путем по стобальной шкале, где 1 – наиболее слабая позиция, а 100 – наиболее сильная. Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1.



Таблица 5.2 Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы	Максимальный балл	Относительное значение (3/4)	Средневзвешенное значение (5x2)x100
1	2	3	4	5	6
Показатели оценки качества разработки					
1. Повышение производительности труда пользователя	0,07	65	100	0,65	4,55
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям)	0,13	75	100	0,75	9,75
3. Помехоустойчивость	0,03	50	100	0,5	1,5
4. Энергоэкономичность	0,1	70	100	0,7	7
5. Надежность	0,09	100	100	1	9
6. Уровень шума	0,04	40	100	0,4	1,6
7. Безопасность	0,01	80	100	0,8	2,4
8. Потребность в ресурсах памяти	0,02	75	100	0,75	1,5
9. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,04	85	100	0,85	3,4
10. Простота эксплуатации	0,04	98	100	0,98	3,92
11. Качество интеллектуального интерфейса	0,05	96	100	0,96	4,8
12. Возможность подключения в сеть ЭВМ	0,06	100	100	1	6
Показатели оценки коммерческого потенциала разработки					
1. Конкурентоспособность продукта	0,03	70	100	0,7	2,1
2. Уровень проникновения на рынок	0,04	80	100	0,8	3,2

3. Цена	0,06	45	100	0,45	2,7
4. Предполагаемый срок эксплуатации	0,08	100	100	1	8
5. Послепродажное обслуживание	0,03	90	100	0,9	2,7
6. Финансирование научной разработки	0,05	78	100	0,78	3,9
7. Срок выхода на рынок	0,03	71	100	0,71	2,13

Окончание таблицы 6.3.

8. Наличие сертификации разработки	0,02	78	100	0,78	3,2
Итого	1				83,35

### SWOT-анализ

SWOT-анализ является инструментом стратегического менеджмента, позволяет оценить такие параметры как: сильные и слабые стороны проекта, а также его возможности и угрозы. Для проведения SWOT-анализа необходимо построить матрицу, в которую записываются приведенные ранее параметры.

При составлении матрицы SWOT удобно использовать следующие обозначения:

- С – сильные стороны проекта;
- Сл – слабые стороны проекта;
- В – возможности;
- У – угрозы.

Таблица 5.3. Матрица SWOT

	Сильные стороны проекта:	Слабые стороны проекта:
	С1. Надежная конструкция; С2. Высокая производительность; С3. Уменьшение затрат на ремонт оборудования; С4. Простота эксплуатации.	Сл1. Накладные расходы; Сл2. Повышение уровня вибрации; Сл3. Высокая техническая ответственность; Сл4. Высокая ответственность за жизни людей.
Возможности:		
В1. Экономия электроэнергии;	В1: С2, С3.	В1: Сл1, Сл3.

В2. Модернизация оборудования;	В2: С1, С2, С3, С4.	В2: Сл2, Сл4.
В3. Увеличение производительности оборудования;	В3: С2, С3.	В3: Сл1, Сл2, Сл3, Сл4.
Угрозы:		
У1. Развитая конкуренция; У2. Выход из строя оборудования; У3. Отсутствие финансового обеспечения.	У1: С2, С3. У2: С1, С3, С4 У3: С3.	У1: Сл1, Сл4. У2: Сл1, Сл2, Сл3, Сл4. У3: Сл1.

На основании матрицы SWOT строятся интерактивные матрицы возможностей и угроз, позволяющие оценить эффективность проекта, а также надежность его реализации.

При построении интерактивных матриц используются обозначения аналогичные самой матрицы SWOT с дополнением знаков (+ / -) для подробного представления наличия возможностей и угроз проекта («+» – сильное соответствие; «-» – слабое соответствие).

Таблица 5.4. Интерактивная матрица возможностей

Возможности	Сильные стороны проекта			
	C1	C2	C3	C4
B1	-	+	+	-
B2	+	+	+	+
B3	-	+	+	-
	Слабые стороны проекта			
	Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
B1	+	-	+	-
B2	-	+	-	+
B3	+	+	+	+

Таблица 5.5. Интерактивная матрица угроз

Угрозы	Сильные стороны проекта			
	C1	C2	C3	C4
У1	-	+	+	-
У2	+	-	+	+
У3	-	-	+	-
	Слабые стороны проекта			
	Сл1	Сл2	Сл3	Сл4
У1	+	-	-	+
У2	+	+	+	+
У3	+	-	-	-

Swot-анализ позволяет оценить такие параметры как: сильные и слабые стороны проекта. В данном проекте преобладают сильные стороны, но не

исключен случай, когда какая-либо одна из слабых сторон окажется наиболее сильным фактором, негативно влияющим на работу устройства, чем все вместе взятые сильные стороны.

### **Определение возможных альтернатив проведения научных исследований**

В предыдущем разделе были описаны методы, которые позволяют выявить и предложить возможные альтернативы проведения исследования и доработки результатов. К их числу относятся технология QuaD, оценка конкурентных инженерных решений, SWOT-анализ. К ним можно добавить ФСА-анализ, метод Кано. Однако, в большей степени все приведенные методы ориентированы на совершенствование результатов научного исследования, находящегося на стадии создания макета, модели системы, прототипа, конечного продукта. Если разработка находится на перечисленных стадиях жизненного цикла нового продукта, можно предложить не менее трех основных вариантов совершенствования разработки или основных направлений научного исследования.

Разработка относится к вышеописанным стадиям, поэтому нет необходимости использовать морфологический подход.

### **Составление сметы**

Смета затрат включает в себя: расходы на материалы, заработную плату, отчисления во внебюджетные фонды и накладные расходы [8].

Для составления сметы используется информация, полученная при расчете параметров линейного графика.

Исходным для определения затрат по основной заработной плате производственного персонала является трудоемкость работ и оклад исполнителей

В состав затрат на разработку проекта включается стоимость всех расходов, необходимых для реализации комплекса работ, составляющих содержание данной разработки.

Расчёт сметной стоимости на выполнение данной разработки производится по следующим статьям затрат:

$$C_{пол} = M + ЗП + Отч + Накл,$$

где  $C_{пол}$  – общая сумма затрат, руб.;

$M$  - затраты на материалы и комплектующие изделия, руб.;

$ЗП$  - заработная плата персонала, участвующего в разработке, руб.;

$Отч.$  – Отчисления во внебюджетные фонды, руб.;

$Накл$  - накладные расходы, руб.

Дополнительную заработную плату рассчитываем по формуле

$$ЗП = (O \cdot 1,1 + З_{над}) \cdot 1,3 \cdot T$$

### **Расчёт затрат на материалы**

Затраты на материалы и комплектующие рассчитываются по формуле:

$$M = C_m \cdot k_m,$$

где  $C_m$  - общая сумма расходов на материалы;

$k_m = 1,1$  - коэффициент, учитывающий транспортные расходы на материалы и комплектующие изделия.

$$M = 500 \cdot 1,1 = 550 \text{ (руб.)}.$$

Под затратами на материал и комплектующие понимаем затраты, связанные с процессом проектирования: затраты на канцелярские товары, использование Internet'а, стоимость краски для принтера [8].

### **Расчёт основной заработной платы**

В расчете основной заработной платы учитываются основная заработная плата работников, непосредственно участвующих в разработке, доплаты по районным коэффициентам и премии.

Основная заработная плата рассчитывается по формуле:

$$ЗП = O \cdot 1,5 \cdot 1,3 \cdot T,$$

где  $O$  – оклад руководителя;

$k = 1,5$  – коэффициент за культурное наследие.

$$ЗП = 5156,6 \cdot 1,5 \cdot 1,3 \cdot 27,1/27,1 = 10055,4 \text{ руб}$$

Заработная плата студента

$$ЗП_{ст} = 3907,7 \cdot 1,5 \cdot 1,3 \cdot T = 7620 \cdot T = 7620 \cdot 103/27,1 = 30187 \text{ руб}$$

### **Дополнительная заработная плата**

Берется, как 12% от основной заработной платы и рассчитывается по формуле

$$ЗП_{дон} = 0,12 \cdot 10055,4 = 1206,6 \text{ руб}$$

$$ЗП_{ст \cdot дон} = 0,12 \cdot 30187 = 3622,4 \text{ руб}$$

### **Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)**

Отчисления во внебюджетные фонды определяются по формуле:

$$Отч. = 0,27,1 \cdot ЗП_{пол},$$

$$Отч. = (10055,4 + 1206,6) \cdot 0,271 = 2950,6 \text{ руб.}$$

$$Отч_{ст} = (33809,4) \cdot 0,271 = 8858 \text{ руб}$$

0,2 % - фонд обязательного страхового отчисления на производстве.

### **Расчёт накладных расходов**

Накладные расходы составляют 16% от общей суммы затрат

$$Накл = 0,16 \cdot С_{пол} = 0,16 \cdot 17574,5 = 2812 \text{ руб.}$$

$$Накл_{см} = 0,16 \cdot 51449,3 = 8231,8 \text{ руб.}$$

### Калькуляция плановой себестоимости

Калькуляция плановой себестоимости осуществляется на основе технико-экономических расчётов, результаты которых могут быть отражены в плановой калькуляции.

Таблица 5.6. – Калькуляция плановой себестоимости

Статья затрат	Сумма, руб.
Затраты на материалы	550
Заработная плата преподавателя	11262
Заработная плата студента	33809,4
Отчисления во внебюджетные фонды	
Преподаватель	2950,6
студент	8858
Накладные расходы	11043,8
ИТОГО	$\Sigma$ 68479,8

### Определение ресурсоэффективности исследования

#### Интегральный показатель финансовой эффективности

Интегральный финансовый показатель разработки определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп } i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{68479,8}{80000} = 0,85,$$

где  $I_{\text{финр}}^{\text{исп } i}$  – интегральный финансовый показатель разработки;

$\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения;

$\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта (в т.ч. аналоги).

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп } i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{68479,8}{80000} = 0,85,$$



$$I_{\text{финр}}^{\text{исп 2}} = \frac{\Phi_{\text{pi}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{80000}{80000} = 1.$$

Полученная величина интегрального финансового показателя разработки отражает соответствующее численное увеличение бюджета затрат разработки в размах (значение больше единицы), либо соответствующее численное удешевление стоимости разработки в размах (значение меньше единицы, но больше нуля).

### Интегральный показатель ресурсоэффективности

В данном разделе необходимо произвести оценку ресурсоэффективности проекта, определяемую посредством расчета интегрального критерия, по следующей формуле:

$$I_{pi} = \sum a_i \cdot b_i,$$

где:  $I_{pi}$  – интегральный показатель ресурсоэффективности;  $a_i$  – весовой коэффициент проекта;  $b_i$  – бальная оценка проекта, устанавливаемая опытным путем по выбранной шкале оценивания.

Расставляем бальные оценки и весовые коэффициенты в соответствии с приоритетом характеристик проекта, рассчитываем конечный интегральный показатель и сводим полученные результаты в таблицу 5.7.

Таблица 5.7 – Сравнительная оценка характеристик проекта

Критерии	Весовой коэффициент	Бальная оценка разработки	Бальная оценка исполнения 2
1. Рост производительности труда пользователя	0,2	5	3
2. Удобство в эксплуатации (соответствует требованиям)	0,25	5	3
3. Энергосбережение	0,15	5	4
4. Надежность	0,15	4	4

5. Предполагаемый срок эксплуатации	0,1	4	4
6. Функциональная мощность (предоставляемые возможности)	0,15	5	3
ИТОГО	1		

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p1} = 0,2 * 5 + 0,25 * 5 + 0,15 * 5 + 0,15 * 4 + 0,1 * 4 + 0,15 * 5 = 4,75$$

$$I_{p2} = 0,2 * 3 + 0,25 * 3 + 0,15 * 4 + 0,15 * 4 + 0,1 * 4 + 0,15 * 3 = 3,4$$

**Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки** определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп1} = \frac{I_{p-исп1}}{I_{исп1}^{финр}} = \frac{4,75}{0,85} = 5,58.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта ( $\mathcal{E}_{ср}$ ):

$$\mathcal{E}_{ср} = \frac{I_{исп1}}{I_{исп2}} = \frac{5,58}{3,4} = 1,64.$$

Таблица 5.8 – Сводная таблица показателей оценки ресурсоэффективности

№ п/п	Показатели	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0,85	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4,75	3,4
3	Интегральный показатель	5,58	3,4

	эффективности		
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1,64	0,58

По факту оценки эффективности ИР, можно сделать выводы:

- Значение интегрального финансового показателя ИР составляет 0,85, что является показателем того, что ИР является финансово выгодной, по сравнению с аналогами;
- Значение интегрального показателя ресурсоэффективности ИР составляет 4,75;
- Значение интегрального показателя эффективности ИР составляет 5,58, по сравнению с 4,5, и является наиболее высоким, это означает, что техническое решение, рассматриваемое в ИР, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

### **Вывод:**

В результате проведения технико-экономического анализа был произведен расчет проектирования дипломной работы.

Построен график выполнения работ, отражающий длительность работы на каждом этапе и последовательность выполняемых работ, составлена смета затрат. Из графиков видно, что работы выполняются последовательно (Тц = 104 дня.).

## **6. СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ**

В данном разделе ВКР рассматривается безопасность и экологичность цеха электроснабжения. Безопасность включает в себя влияние опасных и вредных факторов, их анализ и меры их профилактики.

В настоящем разделе рассматриваются вопросы охраны труда и техники безопасности, связанные с работой в цехе, а также разрабатываются мероприятия по предотвращению воздействия на здоровье работников цеха опасных и вредных факторов, создание безопасных условий труда для обслуживающего персонала.

Для обеспечения безопасных условий эксплуатации электроустановок промышленных предприятий, а также отдельных электрических машин и аппаратов, законодательство РФ предусматривает обязательное выполнение ряда технических и организационных мероприятий. Эти мероприятия регламентируются «Правилами устройства электроустановок», «Правилами технической эксплуатации электроустановок потребителей и правилами техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей», а также специальными правилами безопасности и технической эксплуатации, которые дополняют общие требования и составляют применительно к специфическим условиям конкретной отрасли промышленности.

Контроль за выполнением действующих правил устройства и эксплуатации электроустановок и мероприятий по технике безопасности, выявление и устранение допущенных отступлений от этих правил осуществляется специальной службой данной отрасли промышленности и руководством конкретного предприятия, а также специальными контролирующими организациями.

### **Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

Согласно ТК РФ Статья 92, продолжительность рабочего дня не должна превышать 40 часов в неделю. Для работников до 16 лет – не более 24 часов в неделю, от 16 до 18 лет – не более 35 часов, как и для инвалидов I и II группы. Для

работников, работающих на местах, отнесенных к вредным условиям труда 3 и 4 степени— не более 36 часов [12].

Согласно ТК РФ Статья 93, возможно установление неполного рабочего дня для одного из родителей (опекуна, попечителя), имеющего ребенка в возрасте до четырнадцати лет (ребенка-инвалида в возрасте до восемнадцати лет). Оплата труда при этом производится пропорционально отработанному времени.

Ограничений продолжительности ежегодного основного оплачиваемого отпуска, исчисления трудового стажа и других трудовых прав при этом не имеется [13].

Согласно ТК РФ Статья 96, при работе в ночное время, продолжительность рабочей смены должна составлять на один час меньше. К работе в ночные смены не допускаются: работники, имеющие детей инвалидов, а также работники, осуществляющие уход за больными членами их семей в соответствии с медицинским заключением, отцы одиночки детей до пяти лет [14].

Согласно ТК РФ Статья 108, работнику в течение рабочего дня должен предоставляться перерыв не более 2 часов и не менее 30 минут, который в рабочее время не включается [15].

Согласно ТК РФ Статья 113, всем работникам предоставляются выходные дни, работа в выходные дни производится только с письменного согласия работника [16].

Согласно ТК РФ Статья 122, организация обязана предоставлять ежегодные отпуска продолжительностью 28 календарных дней. Для работников, занятых на работах с опасными или вредными условиями, предусматривается дополнительный отпуск [17].

На работах с вредными или опасными условиями труда, а также на работах, выполняемых в особых температурных условиях или связанных с загрязнением, выдаются прошедшие обязательную сертификацию или декларирование соответствия средства индивидуальной защиты в соответствии с типовыми

нормами, утвержденными в порядке, установленном Правительством Российской Федерации ТК РФ Статья 221 [18].

Рассматриваемую зону можно отнести во 2-й класс – допустимые условия труда характеризуются такими уровнями факторов среды и трудового процесса, которые не превышают гигиенических нормативов для рабочих мест.

Для рассматриваемых условий соответствует допустимый уровень физических нагрузок.

Правильное расположение и компоновка рабочего места, обеспечение удобной позы и свободы трудовых движений, использование оборудования, отвечающего требованиям эргономики и инженерной психологии, обеспечивают наиболее эффективный трудовой процесс, уменьшают утомляемость и предотвращают опасность возникновения профессиональных заболеваний.

Выбор рабочей позы зависит от мышечных усилий во время работы, точности и скорости движений, а также от характера выполняемой работы.

Размерные соотношения на рабочем месте при работе стоя, строятся с учетом того, что рост мужчин и женщин в среднем отличается на 11,1 см, длина вытянутой в сторону руки – на 6,2 см, длина вытянутой вперед руки – на 5,7 см, длина ноги – на 6,6 см, высота глаз над уровнем пола – на 10,1 см. На рабочем месте в позе сидя различия в размерных соотношениях у мужчин и женщин выражаются в том, что в среднем длина тела мужчин на 9,8 см и высота глаз над сиденьем на 4,4 см больше, чем у женщин.

Основные требования к размерам и конструкции рабочего стула в зависимости от вида выполняемых работ приведены в ГОСТ 12.2.032–78 [19] и ГОСТ 21889–76\* [20].

При компоновке постов и пультов управления необходимо знать, что в горизонтальной плоскости зона обзора без поворота головы составляет 120°, с поворотом – 225°; оптимальный угол обзора по горизонтали без поворота головы – 30÷40° (допустимый – 60°), с поворотом – 130°. Допустимый угол обзора по

горизонталью оси зрения составляет  $130^\circ$ , оптимальный –  $30^\circ$  вверх и  $40^\circ$  вниз. Максимальные размеры зон досягаемости правой рукой –  $70\div 110$  см. Глубина рабочей панели не должна превышать 80 см. Высота пульта, предназначенного для работы сидя и стоя, должна быть  $75\div 85$  см. Панель пульта может быть наклонена к горизонтальной плоскости на  $10\div 20^\circ$ , наклон спинки кресла при положении сидя –  $0\div 10^\circ$ .

### Производственная безопасность

Перечень опасных и вредных факторов, характерных для рассматриваемой производственной среды представлен в таблице 6.

Таблица 6 - Возможные опасные и вредные факторы

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Изготовление	Эксплуатация	
Вредные факторы				ГОСТ 12.2.032–78 ССБТ [19]; ГОСТ 21889–76 [20]; СН 2.2.4/2.1.8.562–96 [21]; СП 51.13330.2011 [22]; СП 52.13330.2016 [23]; ГОСТ 12.1.005-88 [24]; СанПиН 2.2.4.548-96 [25]; СП 2.2.1.1312-03 [26]; ГОСТ 12.1.038-82 [28]; ГОСТ 12.1.009-2017 [29]; ГОСТ 12.1.019-2017 [30]; ГОСТ Р 56165-2019 [31];
1. Превышение уровня шума		+	+	
2. Отсутствие или недостаток освещения	+	+	+	
3. Отклонение показателей микроклимата		+	+	
Опасные факторы				
4. Электропоражение	+	+	+	

				ГОСТ 12.1.033-81 [32].
--	--	--	--	------------------------

## **1 Анализ опасных и вредных производственных факторов и обоснование мероприятий по снижению уровней воздействия на работника**

### **Превышение уровня шума**

В данном цехе шум возникает при использовании ремонтного оборудования и при воздействии внешних факторов.

Шум неблагоприятно воздействует на организм человека, вызывает психические и физиологические нарушения, снижение слуха, работоспособности, создают предпосылки для общих и профессиональных заболеваний и производственного травматизма, а также происходит ослабление памяти, внимания, нарушение артериального давления и ритма сердца.

Уровни шума не должны превышать значений установленных в СН 2.2.4/2.1.8.562–96 [21] и СП 51.13330.2011 [22]

По [21] нормируются параметры шума и составляют:

- для цеха составляет 80 дБА.

Меры по борьбе с шумами:

- правильная организация труда и отдыха;
- снижение и ослабление шума;
- применение звукопоглощающих преград;
- применение глушителей шума;

применение средств индивидуальной защиты от шума.

### **Отсутствие или недостаток освещения**

Отсутствие или недостаток естественного освещения на рабочем месте может вызвать ухудшение самочувствия, привести к потере сна и ослаблению здоровья. Причина отрицательного воздействия может заключаться в изменении



циркадных ритмов из-за недостатка естественного света. Поэтому следует уделять большее внимание достаточному дневному освещению для укрепления здоровья и морального состояния работников.

Работа инженера-разработчика имеет третий разряд точности, т.е. при выполнении работ происходит большая нагрузка на органы зрения человека. Освещенность рабочего места должна быть, согласно СНиП 23-05-2010 [23], в пределах 300 лк. (разряд работы IVа, минимальный размер предметоразличения 0,5-1 мм). Обеспечить это требование естественным освещением практически невозможно, поэтому должно применяться комбинированное освещение.

Контроль естественного и искусственного освещения в производственных помещениях следует проводить один раз в год.

### **Отклонение показателей микроклимата**

Под микроклиматом производственной среды согласно ГОСТ 12.1.005-88 [24] понимают сочетание температуры, относительной влажности воздуха и интенсивности теплового излучения. Перечисленные параметры оказывают огромное влияние на функциональную деятельность человека, его самочувствие, здоровье, надежность работы. При их определенных значениях человек испытывает состояние теплового комфорта, что способствует повышению производительности труда, предупреждению простудных заболеваний. И, наоборот, неблагоприятные значения микроклиматических показателей могут стать причиной снижения производственных показателей в работе, привести к таким заболеваниям работающих, как различные формы простуды, радикулит, хронический бронхит, тонзиллит и др.

Работы делятся на три категории тяжести на основе общих энергозатрат организма. Работа в цеху, относится к категории - 1б. Допустимые значения

микроклимата для этого случая даны в таблице 6.1, оптимальные величины приведены в таблице 6.2, согласно [25].

Таблица 6.1 – Допустимые величины показателей микроклимата на рабочих местах цеха

Период года	Температура воздуха, С	Температура поверхностей, С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	15-22	14-23	75-15	0,2-0,4
Теплый	16-27	15-28	75-15	0,2-0,5

Таблица 6.2 – Оптимальные величины показателей микроклимата на рабочих местах цеха

Период года	Температура воздуха, С	Температура поверхностей, С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	17-19	16-20	60-40	0,2
Теплый	19-21	18-22	60-40	0,2

Помещение, его размеры (площадь, объем) должны в первую очередь соответствовать количеству рабочих и размещенному в нем оборудованию.

Для обеспечения нормальных условий, согласно [26], на одного рабочего должно приходиться 4,5 м<sup>2</sup> площади помещения и 20 м<sup>3</sup> объема воздуха.

Помещение имеет следующие параметры:

- длина помещения – 12 м;
- ширина – 6 м;
- высота – 3 м.

Исходя из этих параметров, площадь данного помещения составляет:

$$S = 12 * 6 = 72 \text{ м}^2;$$

объем:

$$V = 12 * 6 * 3 = 216 \text{ м}^3.$$

В цехе работает 7 человек. Значит, на каждого человека приходится 10,3 м<sup>2</sup> рабочей площади и 30,9 м<sup>3</sup> объема воздуха, что удовлетворяет санитарным нормам.

## Электропоражение

Категория помещения по электроопасности – без повышенной опасности (ПУЭ) [27].

Электропоражение персонала, работающего с электроустановками, является опасным для жизни человека и наступает при соприкосновении его с сетью не менее чем в двух точках. Человек ощущает ток величиной в 0,005 А. Ток величиной в 0,05 А считается опасным для жизни, а ток в 0,1 А – смертельным. Наибольшую опасность при эксплуатации электрических устройств и проведении ремонтно-профилактических работ представляет поражение электрическим током вследствие присоединения к токоведущим частям аппаратуры и к частям прибора, находящимся под напряжением.

В соответствии с [28] к поражению электрическим током может привести прикосновение человека к токоведущим частям электроустановок, находящихся под напряжением. Поражение проявляется в парализующем и разрушительном воздействии тока на внешние и внутренние органы – кожный покров, мышцы, органы дыхания, сердце, нервную систему, мозг и т.д. При самом неблагоприятном исходе поражение электрическим током приводит к летальному исходу [29].

Для защиты персонала необходимо применение основных коллективных способов и средств электрозащиты: изоляция проводов и ее непрерывный контроль; предупредительная сигнализация и блокировка; использование знаков безопасности и предупреждающих плакатов; защитное заземление, защитное зануление.

Также, согласно [30], используются индивидуальные электрозащитные средства. В установках до 1000 В используются диэлектрические перчатки, указатели напряжения, диэлектрические коврики и боты, изолирующие подставки, а также инструмент с изолированными рукоятками.

## **Экологическая безопасность**

Производство электродвигателя в первую очередь подразумевает использование ресурсов литосферы, а также гидросферы.

Добыча полезных ископаемых сопровождается разрушением почвенного покрова; изменением или уничтожением естественных ландшафтов, уничтожением мест обитания представителей местной фауны. А также происходит отвалообразование и складирование пустых пород, отходов обогащения и полезных ископаемых. Все это негативно сказывается на литосфере.

Для более рационального использования ресурсов литосферы следует осуществлять наиболее полное извлечение из недр основных и попутных полезных ископаемых, а в последствии рекультивировать нарушенные добычей территории. А также по возможности перерабатывать и вторично использовать добытые полезные ископаемые.

Влияние добычи полезных ископаемых на гидросферу проявляется в истощении водоносных горизонтов и в ухудшении качества подземных и поверхностных вод; в снижении расходов малых рек, чрезмерном осушении болот. Побочное изменение водного режима в результате добычи полезных ископаемых проявляются иногда на площади, почти в 10 раз превышающей территорию, нарушенную добычей.

Строгий контроль за минимально допустимым стоком вод, ограничение их нерационального потребления способствуют защите поверхностных вод от истощения.

Добыча полезных ископаемых воздействует на атмосферу путем образования взвешенных веществ в воздухе, а также загрязнения пылью и газами от работы двигателей внутреннего сгорания.

В соответствие с требованиями [31], для каждого источника загрязнения атмосферы устанавливается предельно допустимый выброс вредных веществ из условия, что выбросы вредных веществ от данного и совокупности источников

города или другого населённого пункта, с учётом перспективы развития промышленных предприятий и рассеивания вредных веществ в атмосфере, не создадут приземную концентрацию, превышающую ПДК для населения, растительного и животного мира.

С целью снижения выбросов загрязняющих веществ в атмосферу необходимо увлажнение горных масс, установка систем пылеулавливания и нейтрализаторов, обеспечивающих снижение выбросов СО.

### **Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Наиболее вероятная чрезвычайная ситуация на рассматриваемом рабочем месте – пожар, которая будет рассмотрена ниже.

#### **Пожар**

Пожаром называется неконтролируемое горение вне специального очага, наносящего материальный ущерб. Согласно ГОСТ 12.1.033 – 81 [32] понятие пожарная безопасность означает состояние объекта, при котором с установленной вероятностью исключается возможность возникновения и развития пожара и воздействия на людей опасных факторов пожара, а также обеспечивается защита материальных ценностей.

Помещение цеха по степени пожароопасности относится к классу П-2а, так как в нем отсутствует выделение пыли и волокон во взвешенном состоянии [27].

Возникновение пожара при работе с электронной аппаратурой может быть по причинам как электрического, так и неэлектрического характера.

Причины возникновения пожара неэлектрического характера:

- а) халатное неосторожное обращение с огнем (курение, оставленные без присмотра нагревательные приборы, использование открытого огня);
- б) самовоспламенение и самовозгорание веществ.

Причины возникновения пожара электрического характера: короткое замыкание, перегрузки по току, искрение и электрические дуги, статическое электричество и т. п.

Для устранения причин возникновения пожаров в помещении лаборатории должны проводиться следующие мероприятия:

а) сотрудники лаборатории должны пройти противопожарный инструктаж;

б) сотрудники обязаны знать расположение средств пожаротушения и уметь ими пользоваться;

в) необходимо обеспечить правильный тепловой и электрический режим работы оборудования;

г) план эвакуации рабочего персонала, пожарный инвентарь и первичные средства пожаротушения должны содержаться в исправном состоянии и находиться на видном и легкодоступном месте (огнетушители марок ОУ-8, ОВП-10; ёмкости с песком).

### **Выводы по разделу**

В разделе были рассмотрены следующие пункты:

Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: организация труда на рабочем месте.

Проблемы производственной безопасности: уменьшение влияние вредных факторов на сотрудников цеха (отклонение показателей микроклимата, повышенный уровень шума, отсутствие или недостаток освещенности);

Уменьшение влияния опасных факторов: предотвращение поражения электрическим током персонала.

Также были рассмотрены вопросы экологической безопасности:

- снижение воздействий на окружающую среду.

Безопасность в чрезвычайных ситуациях:

- предотвращение ЧС.

На основании чего, на предприятии могут быть приняты решения по исключению вышеперечисленных проблем, путем внедрения необходимой аппаратуры в соответствии с проблемой, оптимизирования работы персонала и установок, введению необходимой защиты.

В работе были предложены меры по защите окружающей среды и предотвращению пожаров.

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выпускной квалификационной работы были сформированы предъявляемые требования к электроприводу заслонки и создана модель электропривода задвижки на основе электропривода ГУСАР (без приводного модуля ESD-VCX) в среде Matlab Simulink с использованием технологии S-функции для формирования момента упора. Были получены переходные процессы при различных режимах и заданиях в среде Matlab. На отдельной программке SimBlock, было рассмотрено влияние фазного напряжения. С помощью графического анализа было установлено, что при изменении напряжения, а точнее его снижении на любой из фаз до 120 В, двигатель будет работать, без большой потери качества и без помех, что удовлетворяет требованиям САР.

Разработанная в данном дипломном проекте система управления привода позволит повысить надежность электропривода заслонки, а именно, приведет к повышению безаварийности привода в целом, так как в нефтепроводе любая авария может привести к техногенным последствиям для окружающей природной среды.

В экономической части произведен расчет себестоимости научно-технического проекта.

В разделе “Производственная и экологическая безопасность” рассмотрены вопросы по охране труда и экологии.

При проектировании использовались программы Microsoft Office Word 2007, Microsoft Office Excel 2007, Visio, Matlab v6.1, MathCad v11, Microsoft Office PowerPoint 2007.



## Список литературы

1. Башарин А. В. Управление электроприводами: Учебное пособие для вузов, - М: Энергоиздат, 1982. – 392 с.
2. Блок управления ESD-VCX. Руководство по эксплуатации.
3. Казовский Е.Я. Переходные процессы в электрических машинах переменного тока.–Л.: Изд. Академии наук СССР, 1962.–624 с.
4. Каракулов А.С. Микроконтроллерное управление асинхронным электроприводом запорной арматуры: Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук: - Томск: Б.и., 2005.-136л.: ил .- библиогр.: с.122-129.
5. Каракулов А.С. Разработка цифровых систем управления электроприводами. Лабораторный практикум: - Томск: ТПУ, 2006. – 50 с.
6. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин: Учеб. Для вузов по спец. “Электрические машины”. –М.:Высш. Шк., 1987. -248 с.
7. Нурметов Э.Р. Электропривод заслонки нефтепровода. Труды VI региональной научно-практической студенческой конференции. – Томск: Изд. ТПУ, 2006. – С. 169 – 172.
8. Организация и планирование машиностроительного производства (производственный менеджмент): Учебник / К.А.Грачева, М.К. Захарова, Л.А. Одинцова и др.; Под ред. Ю.В. Скворцова, Л.А.Некрасова. – М.: Высш. шк., 2003. – 470 с.: ил.
9. Системы подчиненного регулирования электроприводов переменного тока с вентильными преобразователями/ Слежановский О.В., Дацковский Л.Х., Кузнецов И.С. и др.–М.: Энергоатомиздат, 1983.–256с.
10. Чернышев А.Ю., Чернышев И.А. Расчет характеристик электроприводов переменного тока. Часть 1. Асинхронный двигатель. - Томск: Изд. ТПУ, 2005. – 136с.
11. Электропривод ГУСАР ЭП. Руководство по эксплуатации.

12. ТК РФ Статья 92. Сокращенная продолжительность рабочего времени.
13. ТК РФ Статья 93. Неполное рабочее время.
14. ТК РФ Статья 96. Работа в ночное время.
15. ТК РФ Статья 108. Перерывы для отдыха и питания.
16. ТК РФ Статья 113. Запрещение работы в выходные и нерабочие праздничные дни. Исключительные случаи привлечения работников к работе в выходные и нерабочие праздничные дни.
17. ТК РФ Статья 122. Порядок предоставления ежегодных оплачиваемых отпусков.
18. ТК РФ Статья 221. Обеспечение работников средствами индивидуальной защиты.
19. ГОСТ 12.2.032–78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования.
20. ГОСТ 21889–76. Система "Человек-машина". Кресло человека-оператора. Общие эргономические требования (с Изменением N 1).
21. СН 2.2.4/2.1.8.562–96. Шум на рабочих местах, в помещениях жилых, общественных зданий и на территории застройки.
22. СП 51.13330.2011 Защита от шума. Актуализированная редакция СНиП 23-03-2003 (с Изменением N 1)
23. СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95\* (с Изменением N 1)
24. ГОСТ 12.1.005-88 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны (с Изменением N 1)
25. СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений.
26. СП 2.2.1.1312-03 Гигиенические требования к проектированию вновь строящихся и реконструируемых промышленных предприятий

27. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). Глава 1.7. Заземление и защитные меры электробезопасности (Издание седьмое).
28. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые уровни напряжений прикосновения и токов.
29. ГОСТ 12.1.009-2017 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Термины и определения.
30. ГОСТ 12.1.019-2017 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты
31. ГОСТ Р 56165-2019 Качество атмосферного воздуха. Метод установления допустимых промышленных выбросов с учетом экологических нормативов
32. ГОСТ 12.1.033-81 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Термины и определения (с Изменением N 1).